



DISEÑO DE UN ARRAY DE RANURAS A 28 GHZ CON RED DE ALIMENTACIÓN CORPORATIVA

Autor: Álvaro Valentín Ortega

Tutora: Eva Rajo Iglesias

Leganés, septiembre de 2017

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Contexto y motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Herramienta de análisis	2
1.4. Regulación y normativa técnica	2
1.5. Estructura del documento	2
2. Antena de ranura	4
2.1. Características generales	4
2.2. Teorema de equivalencia	4
2.3. Métodos de análisis	5
2.4. Parámetros de la antena	6
2.4.1. Impedancia de entrada	6
2.4.2. Coeficiente de reflexión	6
2.4.3. Eficiencia de radiación	6
2.4.4. Intensidad de radiación	7
2.4.5. Diagrama de radiación	7
2.4.6. Directividad	8
2.4.7. Ganancia	9
2.4.8. Polarización	9
3. Diseño de una antena de ranura	10
3.1. Características generales	10
3.2. Diseño	11
3.3. Optimización de parámetros y resultados	15
3.4. Conclusiones	20
4. Diseño de antena de ranura de banda ancha	21
4.1. Características generales	21
4.2. Diseño	21
4.3. Optimización de parámetros y resultados	23
4.4. Conclusiones	27

5. Diseño de la red de alimentación	28
5.1. Características generales	28
5.2. Divisor de 1 a 2	28
5.2.1. Diseño	28
5.2.2. Optimización de parámetros y resultados	32
5.3. Divisor de 1 a 4	33
5.3.1. Diseño	33
5.3.2. Optimización de parámetros y resultados	36
5.4. Divisor de 1 a 8	37
5.4.1. Diseño	37
5.4.2. Optimización de parámetros y resultados	39
5.5. Divisor de 1 a 16	40
5.5.1. Diseño	40
5.5.2. Optimización de parámetros y resultados	43
5.6. Divisor de 1 a 32	43
5.6.1. Diseño	43
5.6.2. Optimización de parámetros y resultados	45
5.7. Divisor de 1 a 64	46
5.7.1. Diseño	46
5.7.2. Optimización de parámetros y resultados	49
5.8. Conclusiones	49
6. Diseño de array de antenas	50
6.1. Características generales	50
6.2. Array de antenas de ranura de 1 x 2	50
6.2.1. Diseño	50
6.2.2. Resultados diseño	52
6.3. Array de antenas de ranura de 2 x 2	54
6.3.1. Diseño	54
6.3.2. Resultados diseño	55
6.4. Array de antenas de ranura de 2 x 4	56
6.4.1. Diseño	56
6.4.2. Resultados diseño	57
6.5. Array de antenas de ranura de 4 x 4	59
6.5.1. Diseño	59
6.5.2. Resultados diseño	60
6.6. Array de antenas de ranura de 4 x 8	62
6.6.1. Diseño	62
6.6.2. Resultados diseño	64
6.7. Array de antenas de ranura de 8 x 8	66
6.7.1. Diseño	66

ÍNDICE GENERAL

6.7.2. Resultados diseño	67
6.8. Conclusiones	68
7. Diseño de estructura periódica de pines	69
7.1. Características generales	69
7.2. Diseño	69
7.3. Optimización de parámetros y resultados	70
7.4. Conclusiones	72
8. Array de antenas de ranura 4 x 4	73
8.1. Array de antenas 4 x 4	73
8.1.1. Diseño	73
8.1.2. Resultados diseño	75
8.2. Pruebas de pines en diseño array 4 x 4	76
8.3. Array final de antenas 4 x 4	80
8.3.1. Diseño final array 4 x 4	80
8.3.2. Resultados diseño final array 4 x 4	81
8.4. Pruebas finales array 4 x 4	83
8.5. Conclusiones	87
9. Array de antenas de ranura 8 x 8	89
9.1. Array de antenas 8 x 8	89
9.1.1. Diseño	89
9.1.2. Resultados diseño	90
9.2. Pruebas de pines en diseño array 8 x 8	92
9.3. Array final de antenas 8 x 8	95
9.3.1. Diseño final array 8 x 8	95
9.3.2. Resultados diseño final array 8 x 8	95
9.4. Pruebas finales array 8 x 8	96
9.5. Conclusiones	99
10. Fabricación y validación experimental	100
11. Planificación, presupuesto y análisis del impacto socio-económico	102
11.1. Presupuesto	102
11.2. Impacto socio-económico	103
12. Conclusiones y líneas futuras	104
Bibliografía	104

Índice de figuras

2.1. Figuras relación teorema de equivalencia	5
2.2. Sistema de coordenadas y diferenciales de superficie	7
2.3. Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas y polares	8
2.4. Clasificación según directividad	9
2.5. Tipos de polarización	9
3.1. Menú Creación de Proyecto	10
3.2. Menú Creación de Plantilla	11
3.3. Menú Condiciones de Contorno (Boundaries)	11
3.4. Menú Creación de Brick	12
3.5. Figura antenna inicial	14
3.6. Figura antenna inicial por caras	14
3.7. Figura puerto de antenna inicial	15
3.8. Parámetro S_{11} inicial	16
3.9. Impedancia característica de línea de transmisión inicial	16
3.10. Impedancia característica de línea de transmisión	17
3.11. Parámetro S_{11}	17
3.12. Configuración de optimizador para la antenna inicial	18
3.13. Parámetro S_{11}	18
3.14. Parámetro S_{11}	19
3.15. Diagrama de radiación de la antenna en 3 dimensiones	19
3.16. Diagrama de radiación de la antenna en cartesianas	19
3.17. Diagrama de radiación de la antenna en polares	20
4.1. Figura antenna de banda ancha inicial	22
4.2. Comparación de figuras antenna de ranura y antenna de ranura de banda ancha	23
4.3. Parámetro S_{11}	23
4.4. Optimizador antenna banda ancha	24
4.5. Figura antenna de banda ancha	25
4.6. Impedancia característica de línea de transmisión	25
4.7. Parámetro S_{11}	26
4.8. Diagrama de radiación de la antenna en 3 dimensiones	26
4.9. Diagrama de radiación de la antenna en cartesianas	26

4.10. Diagrama de radiación de la antena en polares	27
5.1. Figura divisor 1 a 2	31
5.2. Parámetros S del divisor 1 a 2	32
5.3. Parámetros S del divisor 1 a 2	32
5.4. Impedancias características línea de transmisión de divisor 1 a 2	33
5.5. Figura divisor 1 a 4	36
5.6. Parámetros S del divisor 1 a 4	36
5.7. Parámetros S del divisor 1 a 4	37
5.8. Figura divisor 1 a 8	39
5.9. Parámetros S del divisor 1 a 8	39
5.10. Figura divisor 1 a 16	42
5.11. Parámetros S del divisor 1 a 16	43
5.12. Figura divisor 1 a 32	45
5.13. Parámetros S del divisor 1 a 32	45
5.14. Figura divisor 1 a 64	48
5.15. Parámetros S del divisor 1 a 64	49
6.1. Figura array 1 x 2	52
6.2. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 1 x 2	52
6.3. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	53
6.4. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	53
6.5. Diagrama de radiación de la antena en polares	53
6.6. Figura array 2 x 2	55
6.7. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 2 x 2	55
6.8. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	56
6.9. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	56
6.10. Diagrama de radiación de la antena en polares con $\phi = 0$	56
6.11. Figura array 2 x 4	57
6.12. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 2 x 4	58
6.13. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	58
6.14. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	58
6.15. Diagrama de radiación de la antena en polares	59
6.16. Figura array 4 x 4	60
6.17. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4	61
6.18. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	61
6.19. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	61
6.20. Diagrama de radiación de la antena en polares	62
6.21. Figura array 4 x 8	64
6.22. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 8	64
6.23. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	65

6.24. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	65
6.25. Diagrama de radiación de la antena en polares	65
6.26. Figura array 8 x 8	66
6.27. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8	67
6.28. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	67
6.29. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	67
6.30. Diagrama de radiación de la antena en polares	68
7.1. Diagramas de dispersión	71
7.2. Diagrama de dispersión con gap de 1 mm	71
7.3. Diagrama de dispersión con altura de pin de 2.5 mm y periodicidad de 2 mm	71
8.1. Figura array de antenas 4 x 4	74
8.2. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4	75
8.3. Impedancia característica array de antenas de ranura 4 x 4	75
8.4. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	75
8.5. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	76
8.6. Diagrama de radiación de la antena en polares	76
8.7. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4 sin pines	77
8.8. Diagrama de radiación de la antena sin pines en 3 dimensiones	77
8.9. Diagrama de radiación hacia atrás de la antena sin pines en 3 dimensiones	77
8.10. Diagrama de radiación de la antena sin pines en cartesianas	78
8.11. Diagrama de radiación de la antena sin pines en polares	78
8.12. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4 sin metal de pines	78
8.13. Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en 3 dimensiones	79
8.14. Diagrama de radiación hacia atrás de la antena sin metal de pines en 3 dimensiones	79
8.15. Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en cartesianas	80
8.16. Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en polares	80
8.17. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4	81
8.18. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	81
8.19. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	82
8.20. Diagrama de radiación de la antena en polares	82
8.21. Resultados de amplitudes y fases de campo tras colocación sondas	82
8.22. Resultados de amplitudes y fases de campo array 4 x 4 PMC	83
8.23. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4	84
8.24. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	84
8.25. Diagrama de radiación de la antena en plano XZ	84
8.26. Diagrama de radiación de la antena en polares	85
8.27. Resultados de amplitudes y fases de campo tras colocación sondas	85
8.28. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4	86
8.29. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	86

ÍNDICE DE FIGURAS

8.30. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	86
8.31. Diagrama de radiación de la antena en polares	87
8.32. Resultados de amplitudes y fases de campo tras colocación sondas	87
9.1. Figura array de antenas 8 x 8	90
9.2. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8	90
9.3. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	91
9.4. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	91
9.5. Diagrama de radiación de la antena en polares	92
9.6. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8 sin pines	92
9.7. Diagrama de radiación de la antena sin pines en 3 dimensiones	93
9.8. Diagrama de radiación de la antena sin pines en cartesianas	93
9.9. Diagrama de radiación de la antena sin pines en polares	93
9.10. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8 sin metal de pines	94
9.11. Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en 3 dimensiones	94
9.12. Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en cartesianas	95
9.13. Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en polares con $\phi = 0$	95
9.14. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8	96
9.15. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	96
9.16. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	97
9.17. Diagrama de radiación de la antena en polares	97
9.18. Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8	98
9.19. Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones	98
9.20. Diagrama de radiación de la antena en cartesianas	98
9.21. Diagrama de radiación de la antena en polares	99
10.1. Estructura de pines de array 4 x 4	100
10.2. Estructura de pines de array 8 x 8	101
10.3. Comparación estructuras de pines de ambos arrays	101

Índice de tablas

3.1. Parámetros iniciales de la antena	12
3.2. Parámetros iniciales de sustrato	13
3.3. Parámetros iniciales de metal	13
3.4. Parámetros iniciales de ranura	13
3.5. Parámetros iniciales de línea de transmisión	13
3.6. Parámetros iniciales del puerto	15
3.7. Pruebas anchura línea de transmisión	16
4.1. Nuevos parámetros de la antena de banda ancha	21
4.2. Parámetros iniciales de línea de transmisión vertical	22
4.3. Parámetros iniciales de línea de transmisión horizontal	22
4.4. Definición parámetros optimizador antena banda ancha	24
4.5. Parámetros finales antena banda ancha	25
5.1. Parámetros iniciales divisor 1 a 2	29
5.2. Parámetros iniciales de sustrato	30
5.3. Parámetros iniciales de metal	30
5.4. Tramo línea principal 1	30
5.5. Tramo línea adicional	30
5.6. Tramo línea horizontal 2	30
5.7. Tramo línea horizontal 3	31
5.8. Tramo línea vertical 2	31
5.9. Tramo línea vertical 3	31
5.10. Parámetros iniciales divisor 1 a 4	33
5.11. Nueva definición tramos de línea existentes divisor 1 a 4	34
5.12. Tramo línea principal 1.2	34
5.13. Tramo línea adicional 1.2	34
5.14. Tramo línea horizontal 4	34
5.15. Tramo línea horizontal 5	34
5.16. Tramo línea vertical 4	35
5.17. Tramo línea vertical 5	35
5.18. Tramo línea principal 2	35
5.19. Tramo línea adicional 2	35

ÍNDICE DE TABLAS

5.20. Parámetros iniciales divisor 1 a 8	37
5.21. Tramo línea principal 3	38
5.22. Tramo línea adicional 3	38
5.23. Parámetros iniciales divisor 1 a 16	40
5.24. Tramo línea principal 3.1	41
5.25. Tramo línea adicional 3.1	41
5.26. Tramo línea principal 3.2	41
5.27. Tramo línea adicional 3.2	41
5.28. Tramo línea principal 4	42
5.29. Tramo línea adicional 4	42
5.30. Parámetros iniciales divisor 1 a 32	44
5.31. Tramo línea principal 5	44
5.32. Tramo línea adicional 5	44
5.33. Parámetros iniciales divisor 1 a 64	46
5.34. Tramo línea principal 5.1	47
5.35. Tramo línea adicional 5.1	47
5.36. Tramo línea principal 5.2	47
5.37. Tramo línea adicional 5.2	47
5.38. Tramo línea principal 6	48
5.39. Tramo línea adicional 6	48
6.1. Parámetros antena banda ancha array	50
6.2. Tramo línea antena vertical derecha	51
6.3. Tramo línea antena horizontal derecha	51
6.4. Ranura derecha	51
6.5. Ranura izquierda	51
6.6. Tramo línea antena vertical superior derecha	54
6.7. Tramo línea antena horizontal superior derecha	54
6.8. Creación de líneas de antenas restantes	54
6.9. Creación de líneas de antenas restantes	57
6.10. Creación de líneas de antenas restantes	60
6.11. Creación de líneas de antenas restantes	63
7.1. Parámetros iniciales pin	69
7.2. Parámetros iniciales de aire	69
7.3. Parámetros iniciales de vacuum	70
7.4. Parámetros iniciales de pin	70
7.5. Parámetros iniciales de sustrato	70
7.6. Condiciones de contorno pin	70
8.1. Parámetros de pines	73
8.2. Parámetros iniciales de metal de pines	74

ÍNDICE DE TABLAS

8.3. Parámetros iniciales de pin 74

11.1. Tabla resumen horas realizadas por cada tarea 102

11.2. Tabla precio de medios materiales 102

11.3. Tabla precio medios personales 103

11.4. Tabla precio de materiales 103

Agradecimientos

Por fin me encuentro escribiendo esta página. Que decir de estos años, de todas las alegrías y decepciones vividas, así como de todas las personas con los que he compartido estos momentos.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres María Piedad y Julián y a mi hermano Fernando todo el apoyo y la paciencia que han tenido durante todos estos años, que no han sido pocos. Igualmente, a mis abuelos, que me vieron empezar este camino y desgraciadamente no han podido verme acabarlo.

Gracias a toda la gente que he conocido durante este tiempo: Adriano, Patricia, Noe, Gabriel, Javi, Miguel, Sergio, Fer, Ana,... por hacer que estos años hayan sido increíbles.

También muchas gracias a mis amigos de siempre: Linis, Romario, Jesús, Aitor, José, Juan, Jaime,... por esos momentos de diversión y fiestas vividas juntos.

Por último, muchas gracias a Eva Rajo Iglesias, mi tutora, por su inestimable ayuda.

Resumen

En este proyecto se describen las diferentes etapas o pasos que se han llevado a cabo para el diseño de dos arrays de antenas de ranura en tecnología microstrip, un array de dimensiones 4 x 4 y otro array de dimensiones 8 x 8, así como las distintas pruebas o variaciones que se han llevado a cabo en su diseño para conseguir que los resultados de dichos arrays sean óptimos, es decir, para conseguir que nuestros arrays de antenas de ranura estén adaptados a una frecuencia de 28 GHz, aumentando todo lo posible el valor del ancho de banda en la frecuencia asignada, proporcionando la máxima directividad posible a esa misma frecuencia y consiguiendo que la red de alimentación de dicho array tenga una impedancia característica de 50 Ohmios.

Para realizar todos estos diseños y sus posteriores variaciones u optimizaciones se ha utilizado el programa CST Microwave Studio, una herramienta especializada en simulación que permite realizar el análisis preciso y rápido de dispositivos de alta frecuencia.

Este tipo de antenas cobra cada día mayor protagonismo, ya que aportan soluciones versátiles en múltiples sistemas, como pueden ser sistemas de radar de microondas, aplicaciones de navegación o en el estándar 802.11 en redes WLAN ya que son antenas fáciles de integrar y permiten alcanzar directividades altas.

Para comenzar el diseño, el primer paso a realizar es la creación exclusivamente de una antena de ranura básica por separado, para posteriormente construir a partir de esta los dos arrays deseados, realizando un diseño inicial adaptado a 28 GHz y cuya red de alimentación tenga una impedancia característica de 50 Ohmios. Posteriormente, se crea una antena de ranura de banda ancha a partir del diseño de la antena de ranura anterior, obteniendo el diseño óptimo de una antena de ranura de banda ancha mediante una optimización.

Para crear los arrays deseados, inicialmente se debe crear la red de alimentación que dividirá la potencia de entrada de forma equitativa en las 16 ó 64 salidas del array final. Para crear esta red de alimentación final, se comienza diseñando el divisor inicial de la línea de transmisión 1 a 2, para a partir de este, mediante distintas configuraciones, ir aumentando progresivamente el diseño hasta conseguir obtener una red de alimentación divisora de 1 a 16 para el array 4 x 4 y una red divisora de 1 a 64 para el array de antenas de ranura 8 x 8. El objetivo es que las ranuras estén alimentadas todas con la misma amplitud y fase.

Tras la creación de todos estos divisores, se crean los dos arrays deseados 4 x 4 y 8 x 8 además de todos los arrays intermedios. Para ello, en los diseños de estos divisores se deben añadir las ranuras necesarias en cada caso, siendo dichas ranuras del mismo tamaño a la ranura optimizada en el diseño de la antena de ranura de banda ancha por separado.

Posteriormente, se diseña una estructura periódica realizada con pines que evite acoplamientos entre las distintas líneas de transmisión y también la radiación hacia atrás, añadiendo esta estructura a ambos arrays de antenas de ranura. En este punto se observa que los resultados no son tan buenos como se esperaban, por lo que se varía el tamaño y la periodicidad de los pines creados, para finalmente conseguir

RESUMEN

que el array 4 x 4 proporcione una directividad de 18.1 dB y que en el array 8 x 8 se consigan 20.7 dB de directividad.

Tras realizar el diseño óptimo de los dos arrays 4 x 4 y 8 x 8, se procede a su fabricación. En este caso, la estructura de pines del array 4 x 4 se ha fabricado mediante impresora 3D metálica, mientras que para fabricar la estructura de pines del array 8 x 8 se ha utilizado la técnica de fresado. Igualmente, se han mandado fabricar los circuitos de ambos arrays de antenas de ranura que no se han podido realizar en las instalaciones de la universidad por las reducidas dimensiones de algunas líneas, pero aún no se han recibido dichos prototipos.

El objetivo fundamental de este proyecto era el diseño y fabricación de un array de antenas de ranura 8 x 8 con amplitudes y fases uniformes y con elementos separados menos de λ para evitar “grating lobes”. La optimización lograda en los dos diseños realizados ha sido aceptable, ya que se buscaba para el parámetro S_{11} unos niveles por debajo de -10 dB, valor que se ha superado en el rango de frecuencias en el que trabaja nuestro array de antenas. De este modo, se han conseguido unos niveles de directividad muy buenos, ya que en el diseño de menor tamaño se han conseguido 18 dB y en el diseño de mayor tamaño unos 20 dB.

Abstract

This project explains the different stages or steps that have been carried out for the creation of two arrays of slot antennas in microstrip technology, an array of dimensions 4 x 4 and another array of dimensions 8 x 8, as well as the different tests or variations that have been carried out in its design to make the results of said arrays are optimal. This project aims to meet the following objectives:

- Frequency: The array of slot antennas to be optimized must be adapted to a frequency of 28 GHz.
- Bandwidth: The bandwidth value at the assigned frequency is to be increased as much as possible.
- Directivity: The final array design should provide the highest directivity possible.
- Power line characteristic impedance: The power supply network to be designed must have a reference impedance of 50 Ohms.

In order to realize all these designs and their subsequent variations or optimizations, the CST Microwave Studio program has been used, a specialized tool in simulation that allows the accurate and fast analysis of high frequency devices such as antennas, filters or couplers. In this case, this project will use the Transient Solver simulator, which provides propagation in the time domain, as well as the use of Waveguide Port ports and the use of certain specific boundary conditions depending on the design stage of our array in which we are, since in the beginning these conditions of contour will be varied so that our antenna only radiate towards Z positive and does not have radiation towards back, changing those conditions when the pins are introduced so that the antenna from that moment radiate to all directions of space.

To better understand the design of our array, you first have to understand the concept of slot antenna. Antennas are devices that radiate or receive electromagnetic waves, also considered as transducers that couple the waves that propagate in free space to a waveguide or transmission line. The antennas are part of the wireless communications systems in point-to-point radio-relay, mobile telephony, navigation systems, communications between satellites and several military applications. The antennas are characterized by several parameters, such as:

- Input impedance: It is the relation between the voltage and current present at the input port. The input impedance is a parameter of great transcendence since it determines the voltage value to be supplied by the generator and, consequently, a specific radiated power.
- Reflection coefficient: It is the relation between the power that is delivered to the antenna and the power that could have been delivered if that antenna had been perfectly adapted.
- Radiation efficiency: It is the relation between the power radiated and the power delivered to the antenna. item Radiation intensity: The radiated power per unit of solid angle in a given direction, that is to say that it is its capacity to radiate with certain directionality.
- Radiation diagram: It is the graphic representation of the radiation properties of the antenna as a function of the different directions of the space. The radiation pattern of an antenna can be expressed

ABSTRACT

in 3 dimensions or 2 dimensions (Cartesian or polar coordinates), where all the antenna lobes (main and lateral) are represented.

- Directivity: It is the relation between the density of power radiated in a direction and the density of power that would radiate to that same distance an isotropic antenna. item Gain: Its definition is similar to the one of directivity, since both concepts are related by the efficiency of the antenna.
- Polarization: It is the direction in which the antenna radiates the maximum of power, being able to be linear, circular and elliptical polarization.

These antennas must comply with Royal Decree 1066/2001, which establish conditions for the protection of the radio-electric domain, restrictions on emissions and measures to protect the population's health against radio-electric emissions (limits are set for exposure to radio-electric emissions).

Opening antennas are becoming increasingly important, as the reality that surrounds us is increasingly characterized by a wireless world, such as mobile phones, computers, headsets or mice, achieving versatile solutions in multiple systems in which a radiant element is required. This type of antennas began to be used more broadly from World War II, with the development of radar systems and microwave communications systems. This is due to its main characteristics, among which are its ease of construction and integration, good radiation control as well as the possibility of achieving high directivities.

Opening antennas can be divided into 4 large groups, such as slots (which is the case here), speakers, parabolic reflectors and lenses.

A slot antenna consists of the construction of a slot in a region of flat surface on which there exist fields E and H, where the shape and size of the slot determines the size of the distribution of the radiation, or as in the case of this project, the construction of an array of several slots in one plane, in this case with a geometric distribution 4 x 4 or 8 x 8 of slot antennas in one plane. The slot antennas provide little gain and in this sense are very suitable elements to form an array, in addition they are simple antennas and quite efficient.

The radiation problems produced by the slots are solved by means of the equivalence theorem, which allows to replace the existing E and H fields on the surface by a distribution of equivalent currents, neglecting the rest of the exterior wall currents, which is equivalent to consider only the currents circulating inside the antenna.

In this project an array of slot antennas is designed, where the signal propagates from the transmission line to each of the design slots, where a small part of the signal energy is radiated, to finally sum all the signals radiated by each slot and thus achieve a significant directivity.

In this case, both slot antenna arrays to be designed operate at a frequency of 28 GHz, that is, in the SHF (Super High Frequency) band, a typical range used by UHF antennas. In particular, slot antennas are resonant antennas that have a fairly narrow range of working frequencies.

After a better understanding of the slot antenna concept, the design of these arrays is started. In order to start the design, the first step is to create a separate slot antenna, to build the desired two arrays from there, making an initial design of the antenna and then changing the design to obtain our slot antenna is adapted to a frequency of 28 GHz and that the power supply of this antenna has a characteristic impedance of 50 Ohms.

ABSTRACT

For the creation of this slot antenna, all necessary parameters and components that form our slot antenna (substrate (Rogers RO4003C), metal with slot and transmission line) have been created in the CST program. Thereafter, the width of the transmission line and the slot (W_l and W_r) are modified to achieve the expected results, thus achieving that the parameter S_{11} is adapted to 28 GHz, a characteristic impedance of 50 Ohms and a directivity of 7 dB.

Subsequently, a broadband slot antenna is created from the design of the front slot antenna. For this, two new sections of lines attached transmission to the existing line are added and subsequently the parameters of all variables (variables of the transmission line and slot) are optimized to achieve our design continue to provide the expected results, a parameter S_{11} = -18 dB at 28 GHz, an impedance of 50 Ohms and directivity 7 dB, noting that the size of the current slot is greater than the size of the initial slot. After performing such optimization the optimal design of a slot antenna broadband subsequently form different slot antennas arrays is obtained.

To create the desired arrays, you must initially create the input transmission line that will lead to the 16 or 64 outputs of the final array. To create this final transmission line, we start by designing the initial splitter of the transmission line 1 to 2, for this, by means of rotations and different configurations, gradually increase the design until we obtain divider from 1 to 16 for the array 4 x 4 and a divider from 1 to 64 for the array of 8 x 8 slot antennas.

Initially, this splitter 1 to 2 is created using several transmission lines of a width W_l and an additional line of width W_{la} and length L_{la} to optimize, as well as with the use of the *chamfer* tool, which consists of removing the corners of the design, but keeping the width of the line to continue obtaining the same characteristic impedance of 50 Ohms in the line. The design of said divider is configured such that the distance between the center of the upper outlets of the line should be $d = 0.8\lambda_0$, so that there are no problems of Grating Lobes unwanted) or overlapping problems between the lines (being a lower distance).

Subsequently, after optimizing the parameters in the layout of splitter 1 to 2, splitter 1 to 4 is created from splitter 1 to 2, with the creation of more transmission lines and with the realization of more configurations and more optimizations to make the parameter S_{11} as adaptable as possible and the same characteristic impedance. In the same way, and following these same steps in a systematic way, the design is increased successively until obtaining the dividers from 1 to 16 and from 1 to 64 desired.

After the creation of all these divisors, all possible arrays are created, although in this case special emphasis is placed on the two divisors 1 to 16 and 1 to 64, from which the two desired arrays are created. To do this, in the designs of these dividers must be added the necessary slots in each case, 16 slots for the array 4 x 4 and 64 slots for the array 8 x 8, said slots are the same size to the optimized slot in the design of the separate wideband slot antenna.

Subsequently, you should create the periodic pin structure that prevents our array of slot antennas from radiate back and possible couplings between the power lines of the slots. To do this, several tests are performed varying the dimensions (gap, height or periodicity) of the pins to check their efficiency, choosing in this case to design the pins with a height of 2 mm, period of 3 mm and gap of 1 mm.

After verifying that the best possible dimensions for the creation of the pins have been chosen, the pin structure created with these dimensions is added to both designs to avoid that our array of slot antennas radiate backwards. To create such an array of pins, a metal is created on which the different pins are placed, this metal will not have thickness in the experiments, but for its construction will be used a metal of 2 mm of thickness, since a surface is needed it large enough and robust enough to prevent the design from bending.

ABSTRACT

After adding the pin structure to the two designs of the previous arrays, the complete designs are simulated, comparing the results obtained with two other simulations in each case in which no pins are used (only the pin metal), nor the metal of the pins, with which it is deduced that the array of pins is strictly necessary to avoid or minimize as far as possible the radiation backwards, since our antenna radiates in all the directions of the space.

Subsequently, the design of our arrays is again varied to have a square figure, making both designs are symmetrical and so that the results are also as symmetrical as possible. After seeing that with the current configuration the results are not as good as expected, the size and periodicity of the pins created vary, to finally use a 2.5 mm high pins and a 2 mm period.

With this configuration, in the array of 4 x 4 slot antennas a parameter S_{11} of -21.1 dB is obtained at the frequency of 28.15 GHz, a bandwidth of 1 GHz at -10 dB, a directivity of 18.1 dB at 28 GHz and reverse radiation is avoided.

Similarly, in the array of 8 x 8 slot antennas, a parameter S_{11} is obtained from -33.0 dB to 29.0 GHz, a bandwidth of 2 GHz at -10 dB, a directivity of 20.7 GHz at the working frequency and back radiation is minimized.

Probes have been configured in the array of 4 x 4 slot antennas to verify that the amplitude and phase of the electric field created is the same in all design slots at the 28 GHz frequency. In this case, there is a variation of both amplitude and phase of the electric field in the slots where the transmission line feeding said slot is very close to other lines of the power supply (without overlap), which implies that there is interference between the lines and causes amplitude and phase values to exist that vary with respect to the values obtained in the rest of the slots in the array.

After realizing the optimum design of the two 4 x 4 and 8 x 8 arrays, it is proceeded to be fabricated, for that purpose, before changing the designs, enlarging the dimensions of both arrays, and removing a pin from the corners, everything this to make holes in the corners that allows to connect the metal of the pins to the circuit of array of antennas of slot by means of a “screw”.

Regarding its construction, the structure of pins of the array 4 x 4 has been manufactured with the use of a metallic 3D printer, while the structure of pins of the array 8 x 8 has been manufactured by milling, being better finalized of the 8 x 8 array made by milling.

It has also been ordered to manufacture the circuits of both arrays of slot antennas, which have not been able to perform in the university facilities due to the small dimensions of some lines, but have not yet received such prototypes.

Finally, after the manufacture of our slot antenna arrays, we calculate the total cost of the project, taking into account the hours that have been needed to carry out the different phases of project development, the cost of personal media and the cost of the materials. All this, makes the total cost of this TFG is 6155.31 €.

The objective of this project was the creation of an array of 8 x 8 slot antennas, although an array of 4 x 4 slot antennas has also been made. For this purpose, the study and design of a procedure for optimization of said slot antenna arrays. The optimization achieved in the two designs performed was acceptable, since the parameters S_{11} were looking for levels below -10 dB, a value that has been exceeded in certain frequency ranges, especially in the range of frequencies in which our array of antennas works. In this way,

ABSTRACT

very good levels of directivity have been achieved, since in the smaller design 18 dB has been achieved and in the larger design 20 dB.

The realization of this project opens a great variety of future lines. Seeing the results obtained in the larger design, one could study the creation of an array of antennas with a larger slot, that is, of dimensions 16 x 16. In the same way, another future line of work would be the final creation of a array of 2 x 2 slot antennas if the dimensions to which the design is to be integrated were limited. Finally, another future line would be to do this same study for different types of materials, to observe and compare in which of them they obtain better results.

Capítulo 1

Introducción

Las antenas son dispositivos que radian o reciben ondas electromagnéticas, también consideradas como transductores que acoplan las ondas que se propagan en el espacio libre a una guía de onda o línea de transmisión. Las antenas forman parte de los sistemas de comunicaciones inalámbricas en radioenlaces punto a punto, telefonía móvil, sistemas de navegación, comunicaciones entre satélites y varias aplicaciones militares.

Las antenas de apertura cobran cada día mayor protagonismo, consiguiendo soluciones versátiles en múltiples sistemas en los que se requiere un elemento radiante. Este tipo de antenas se empezó a utilizar de manera más amplia a partir de la segunda guerra mundial, con el desarrollo de los sistemas de radar y los sistemas de comunicaciones de microondas. Esto es debido a sus principales características, entre las que se encuentran su facilidad de integración, el buen control de radiación así como la posibilidad de conseguir directividades elevadas.

Las antenas de ranura, consisten en la construcción de una apertura estrecha en un plano, o como en el caso de este proyecto, el array de varias ranuras en un plano. Las antenas de ranura proveen poca ganancia y en este sentido son elementos muy adecuados para formar un array, además son antenas sencillas y bastante eficientes.

Este tipo de array de antenas se suele utilizar en aplicaciones como sistemas de radar de microondas, aplicaciones de navegación o en el estándar 802.11 en redes de área local inalámbrica (WLAN).

1.1. Contexto y motivación

En este proyecto se plantea el diseño mediante el programa CST Microwave Studio de un array de antenas de ranura de tamaño 4×4 u 8×8 en tecnología microstrip. Esto incluye el diseño de su red de alimentación que será de tipo corporativo para alimentar todos los elementos con la misma amplitud y fase y de esta manera conseguir la máxima directividad.

Para ello, se optimizarán ciertos parámetros de las dimensiones del array de antenas. Se dividirá el proyecto en varias partes o etapas, partiendo de una única antena de ranura alimentada por una línea de transmisión hasta llegar a obtener un array de antenas de dimensiones 8×8 , tras optimizar y obtener los resultados esperados en varias etapas intermedias (2×2 ó 4×4). Para finalizar, después de obtener dicho array de antenas, se añadirá en la parte posterior del array una estructura periódica que consiste en un array de pines para evitar la radiación hacia atrás del sistema completo. Además, esta estructura evitará también los acoplos entre las líneas de alimentación de las ranuras.

Este proyecto se lleva a cabo con la motivación de conseguir un diseño y posterior fabricación de dicho array que proporcione la mayor directividad posible seleccionando como frecuencia de diseño 28 GHz, una frecuencia ya cercana a las bandas de milimétricas y que se considera una de las posibles bandas a utilizar por los nuevos sistemas 5G en algunos países.

1.2. Objetivos

Como se ha mencionado en el apartado anterior, se va a proceder al diseño y optimización de un array de antenas de ranura. Las especificaciones de partida del diseño son:

1. **Frecuencia:** Conseguir que el array de antenas a optimizar este adaptado a una frecuencia de 28 GHz.
2. **Ancho de banda:** Aumentar todo lo posible el valor del ancho de banda en la frecuencia asignada.
3. **Directividad:** El diseño del array final debe proporcionar la mayor directividad posible, para ello, tenemos que alimentar todas las ranuras con la misma amplitud y fase y la separación entre ellas tiene que ser menor que λ .
4. **Impedancia característica de línea de alimentación:** La red de alimentación se diseñará para una impedancia característica de referencia de 50 Ohmios con el objetivo de utilizar un conector de la misma impedancia.

1.3. Herramienta de análisis

CST Microwave Studio es una herramienta especializada para la simulación EM 3D de componentes de alta frecuencia, un simulador de onda completa utilizado para todo tipo de dispositivos de microondas, lo que lo convierte en la primera opción de la industria para un número creciente de ingenieros. CST MWS permite el análisis rápido y preciso de dispositivos de alta frecuencia como antenas, filtros, acopladores o estructuras planas.

El simulador utilizado en el presente proyecto ha sido el Transient Solver, simulador electromagnético 3D que proporciona la propagación en el Dominio del Tiempo, pero CST MWS también ofrece el solucionador de Dominio de Frecuencia y otros módulos de solver adicionales para aplicaciones específicas.

1.4. Regulación y normativa técnica

Desde hace varias décadas, han aumentado los servicios de radiodifusión utilizados por los ciudadanos, siendo particularmente apreciable en los servicios de telefonía móvil, lo que supone una mayor exposición a los campos electromagnéticos que estos producen.

Debido a ello, se creo el Real Decreto 1066/2001, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio radioeléctrico, restricciones a las emisiones y medidas de protección sanitaria de la población frente a las emisiones radioeléctricas, para ello se establecen unos límites de exposición a campos electromagnéticos procedentes de emisiones radioeléctricas, acordes a recomendaciones europeas (estableciendo restricciones básicas y unos niveles de referencia que deberán cumplir los elementos o instalaciones radioeléctricas).

Adicionalmente, el Real Decreto 1451/2000 atribuye a la Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información la competencia para la planificación, gestión y administración del dominio público radioeléctrico, y el Real Decreto 1450/2000 atribuye a la Dirección General de Salud Pública y Consumo la competencia para la evaluación, prevención y control sanitario de las radiaciones.

1.5. Estructura del documento

Con el fin de hacer lo mas clara posible la lectura del proyecto, este se ha estructurado de la siguiente manera:

- Primeramente se incluye un capítulo en el que se explican las diferentes características de una antena de ranura, de forma mas teórica, seguido de otro capítulo (número 3) que presenta el diseño de la antena elemental formada por una ranura básica.
- El siguiente capítulo modifica el diseño del capítulo 3 para conseguir una antena de ranura de banda ancha.
- A continuación, en el capítulo 5 se presentan las distintas etapas que se han seguido para el diseño de la red de alimentación hasta obtener un divisor de 1 a 64 puertos.
- El capítulo 6 contiene las diferentes etapas seguidas para conseguir el diseño del array final de tamaño 8 x 8.
- Para concluir el diseño, se crean la estructura periódica de pines que se añadirá al array, tanto para el caso del array 4 x 4, como para el array 8 x 8, realizando diversos diseños y pruebas distintas para la obtención del mejor diseño posible.
- El siguiente capítulo, trata sobre la fabricación final y validación experimental de los arrays 4 x 4 y 8 x 8 que lamentablemente no está completa en el momento de entregar esta memoria.
- A continuación, se incluye un capítulo sobre el análisis socio-económico del proyecto y su presupuesto.
- Finalmente, se exponen las conclusiones obtenidas.

Capítulo 2

Antena de ranura

2.1. Características generales

Una antena según el IEEE es “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas”, o lo que es lo mismo, es la transición entre un medio guiado y el espacio libre.

En este proyecto, se van a utilizar antenas de apertura trabajando a una frecuencia de 28 GHz, por lo que se trabajará en la banda SHF (Super High Frequency), rango típico utilizado comúnmente por las antenas de apertura (UHF o superior). En concreto, las antenas de ranura son antenas resonantes que tienen, relativamente, un margen bastante estrecho de frecuencias de trabajo.

Las antenas de apertura se pueden dividir en 4 grandes grupos, como las ranuras (que es caso que nos ocupa), las bocinas, los reflectores parabólicos y las lentes.

Consideraremos como ranura o apertura la región plana de superficie sobre la que suponemos que existen unos campos E y H , donde la forma y el tamaño de la ranura determinan el tamaño de la distribución de la radiación.

Las antenas de ranura proveen poca ganancia y no cuentan con alta direccionalidad, características de radiación muy similares a las de los dipolos. La característica más atractiva de las antenas de ranura es su facilidad de construcción e integración de las mismas en diseños existentes, así como su bajo coste. Igualmente, la pérdida de energía en este tipo de antenas es prácticamente nula, por lo que son ideales para transmitir la energía en la frecuencia a la que trabajamos, cosa que ninguna otra antena puede realizar.

En un array de antenas de ranura, la señal se propaga desde la línea de transmisión hasta cada una de las ranuras, donde una pequeña parte de la energía de la señal se radia, con lo cual, es necesario considerar las características básicas de geometría, amplitud y fase del campo radiado más los efectos del acoplamiento mutuo entre las ranuras y la red de alimentación. En base de la distribución de las ranuras todas las señales radiadas se suman para conseguir una significativa directividad.

2.2. Teorema de equivalencia

El teorema de equivalencia tiene una gran relevancia, ya que permite resolver problemas de radiación producidos por aperturas (ranuras), debido a que nos permite sustituir los campos E y H existentes sobre una superficie por una distribución de corrientes equivalentes a partir de las cuales se puede calcular el campo radiado.

Por el teorema de unicidad, si se conoce el valor de las componentes tangenciales de E y H sobre la superficie S , se puede sustituir para las fuentes exteriores al volumen V por el conocimiento de los campos tangenciales E y H sobre S . Entonces el teorema de equivalencia nos permite sustituir el problema por

otro en el que dentro del volumen que ocupan las fuentes se imponen campos nulos y se mantienen los valores tangenciales sobre la superficie S.

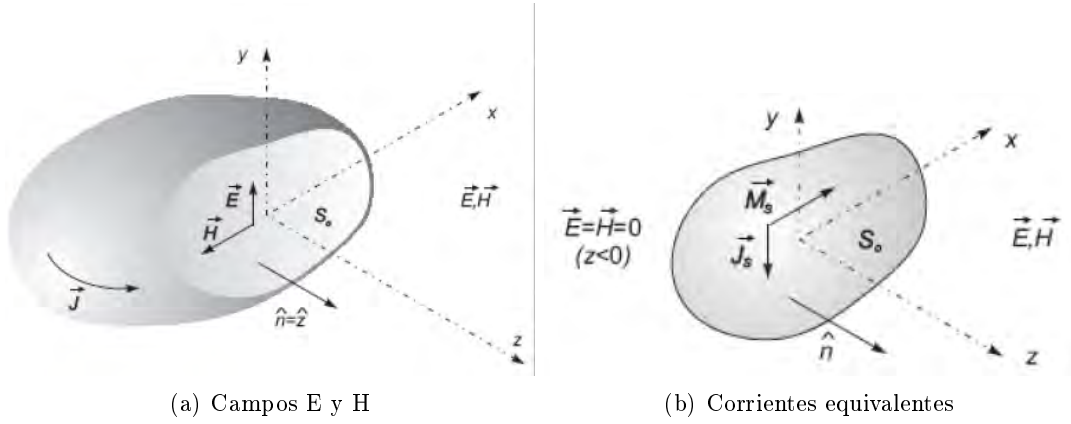


Figura 2.1: Figuras relación teorema de equivalencia

$$\vec{J}_S = \hat{n} \times \vec{H} \quad (2.1)$$

$$\vec{M}_S = -\hat{n} \times \vec{E} \quad (2.2)$$

Estas corrientes equivalentes solo son significativas en la apertura S, ya que se desprecian el resto de corrientes de las paredes exteriores en su contribución al campo radiado, lo que equivale a considerar solamente las corrientes que circulan por el interior de la antena.

2.3. Métodos de análisis

Básicamente, el problema de análisis de antenas trata de resolver las ecuaciones de Maxwell, con unas condiciones de contorno determinadas por los conductores y dieléctricos de los que está formada la antena.

Las antenas de ranura tienen dimensiones pequeñas comparadas con λ , por lo que se analizan a partir de la distribución de corrientes. Por lo tanto, se puede calcular el campo radiado fuera de dicha superficie a partir de las corrientes equivalentes explicadas en la sección anterior, aplicando el potencial vector F para las corrientes eléctricas o el potencial vector A para las corrientes magnéticas.

Para ello, supongamos la superficie plana en el plano XY, donde conocemos los campos en la apertura:

$$\vec{E}_{ap} = E_x(x, y)\hat{x} + E_y(x, y)\hat{y} \quad (2.3)$$

$$\vec{H}_{ap} = H_x(x, y)\hat{x} + H_y(x, y)\hat{y} \quad (2.4)$$

Y además, sabemos que: $\hat{n} = \hat{z}$

- Si conocemos solo el campo eléctrico en la apertura, introducimos una corriente magnética equivalente: $\vec{M}_S = -2\hat{n} \times \vec{E}$ y a partir de aquí podemos calcular el potencial vector:

$$\vec{F} = -\frac{\varepsilon}{2\pi} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \hat{z} \times \vec{f} \quad (2.5)$$

donde

$$\vec{f} = \int \int_{ap} \vec{E}_{ap} e^{jkr\hat{r}} dS' \quad (2.6)$$

Con lo que se pueden obtener los campos radiados:

$$E_\theta = -j\omega\eta F_\varphi \quad (2.7)$$

$$E_\varphi = j\omega\eta F_\theta \quad (2.8)$$

- De forma análoga se puede hacer si conocemos solo el campo magnético en la apertura, donde introducimos una corriente equivalente: $\vec{J}_S = 2\hat{n} \times \vec{H}$ y a partir de aquí podemos calcular el potencial vector:

$$\vec{A} = -\frac{\mu}{2\pi} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \hat{z} \times \vec{a} \quad (2.9)$$

donde

$$\vec{a} = \int \int_{ap} \vec{H}_{ap} e^{jk\vec{r}\cdot\vec{r}} \hat{r} dS' \quad (2.10)$$

Con lo que se pueden obtener los campos radiados:

$$E_\theta = -j\omega A_\theta \quad (2.11)$$

$$E_\varphi = -j\omega A_\varphi \quad (2.12)$$

Estas expresiones, al considerar únicamente la contribución de la distribución de campos en la apertura de la antena, ofrecen resultados precisos únicamente para direcciones próximas al lóbulo principal y primeros lóbulos secundarios.

2.4. Parámetros de la antena

Una antena esta caracterizada por varios parámetros importantes, como pueden ser: impedancia de entrada, eficiencia, diagrama de radiación, directividad o ganancia.

A continuación se presentan los distintos parámetros que caracterizan a una antena:

2.4.1. Impedancia de entrada

Una antena es un dispositivo de un puerto, por lo que presenta una impedancia de entrada, que es la relación entre la tensión y la corriente presente en el puerto de entrada. La impedancia de una antena tiene una parte real y otra imaginaria, ambas dependientes de la frecuencia, siendo la antena resonante si a una frecuencia f_0 la parte imaginaria de la impedancia de entrada es cero. Una antena presenta generalmente muchas resonancias, denominadas "modos".

La impedancia de entrada es un parámetro de gran trascendencia ya que condiciona el valor de tensión que debe suministrar el generador y, en consecuencia, una potencia radiada concreta.

2.4.2. Coeficiente de reflexión

Establece la relación entre la potencia que se entrega a la antena y la potencia que se hubiera podido entregar si dicha antena hubiera estado perfectamente adaptada (en condiciones de máxima transferencia de potencia).

2.4.3. Eficiencia de radiación

Se define eficiencia de radiación como la relación que existe entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena, siendo la potencia entregada a la antena la suma de la potencia radiada y la potencia

disipada a causa de pérdidas en la antena, pérdidas en el conductor o reflexiones por falta de adaptación.

Naturalmente interesa que la eficiencia sea del 100 %, por lo que se debe intentar maximizar el valor adaptando la antena y usando materiales y estructuras geométricas eficientes. En este sentido, para que una antena de apertura sea eficiente y tenga alta directividad tiene que tener un área comparable o mayor a λ^2 .

2.4.4. Intensidad de radiación

Una de las características fundamentales de la antena en su capacidad para radiar con cierta direccionalidad, es decir, para concentrar la energía radiada en ciertas direcciones del espacio.

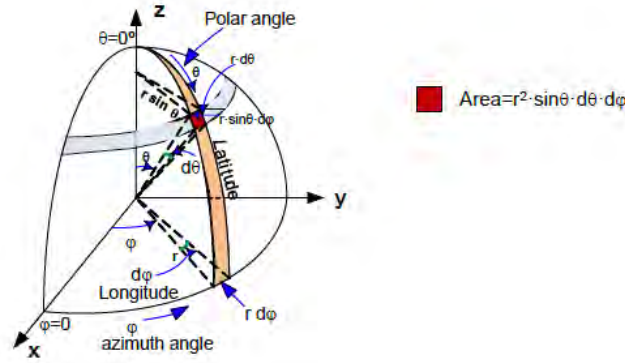


Figura 2.2: Sistema de coordenadas y diferenciales de superficie

La intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección, siendo independiente de la distancia a la que se encuentra la antena si se trata de grandes distancias:

$$U(\theta, \varphi) = r^2 W(\theta, \varphi) [W] \quad (2.13)$$

donde

$$W(\theta, \varphi) = \langle \vec{S} \rangle \quad (2.14)$$

Se puede calcular la potencia total radiada integrando la intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio:

$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \varphi) d\Omega [W] \quad (2.15)$$

donde $d\Omega$ es el diferencial de ángulo sólido: $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$

2.4.5. Diagrama de radiación

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las diferentes direcciones del espacio (coordenadas esféricas) a una distancia fija, expresando el campo eléctrico (o el campo magnético) en función de las variables angulares θ y φ . El diagrama de radiación cobra especial relevancia en la zona de campo lejano, donde el diagrama es invariante en función de la distancia.

$$r(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{mx}} = \frac{W(\theta, \varphi)}{W_{mx}} \quad (2.16)$$

El diagrama de radiación de una antena suele representarse en coordenadas polares o cartesianas, mediante cortes extraídos del diagrama tridimensional para una φ constante y/o una θ constante (planos principales).

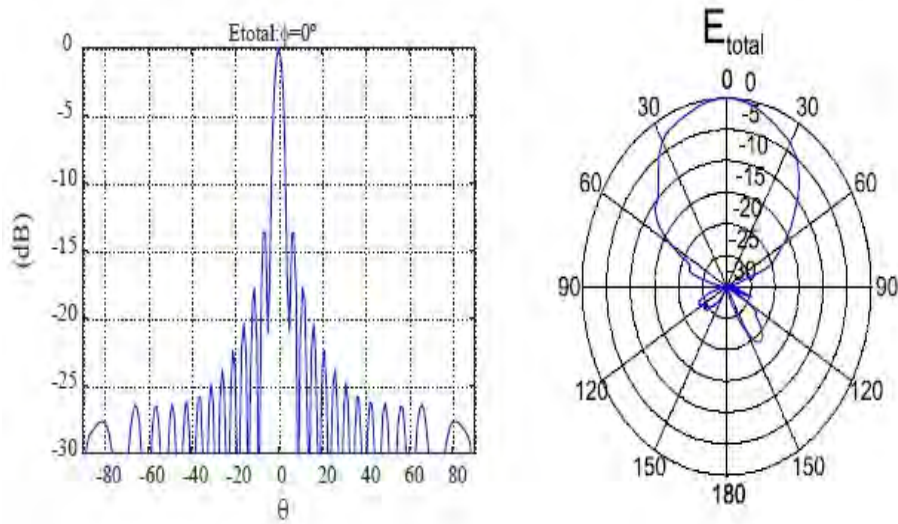


Figura 2.3: Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas y polares

Existen varios parámetros importantes relacionados con el diagrama de radiación:

- Lóbulo principal: Zona en la que la radiación es máxima.
- Lóbulos secundarios: Lóbulo lateral de mayor amplitud.
- Lóbulos laterales: Zona que rodea los máximos de menor amplitud.
- Lóbulo posterior: Zona opuesta al lóbulo principal.
- Ancho de haz a mitad de potencia ($\Delta\theta_{-3dB}$): Separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación toma el valor mitad del máximo.
- Ancho de haz entre ceros ($\Delta\theta_Z$): Separación angular de las direcciones en las que el lóbulo principal toma un valor nulo.
- Relación delante-detrás (D/D): Cociente (dB) entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior.
- Relación lóbulo principal a secundario (SLL): Cociente (dB) entre el lóbulo principal y el lóbulo secundario.

2.4.6. Directividad

La directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección (a una distancia dada) y la densidad de potencia que radiaría a esta misma distancia una antena isotrópica (radiación de referencia) que radiase la misma potencia que la antena transmisora.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{W(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (2.17)$$

La directividad puede obtenerse a partir del conocimiento del diagrama de radiación de la antena:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi}{\Omega_p} \quad (2.18)$$

donde Ω_p se define como el ángulo sólido equivalente: $\Omega_p = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi r(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$

De manera gráfica, se puede decir que si una antena es muy directiva, es capaz de concentrar la potencia que radia en una determinada dirección. Cuánto más alta sea la directividad, el haz de radiación será más afilado. A continuación, se muestran tres gráficas distintas según sea su directividad:



Figura 2.4: Clasificación según directividad

2.4.7. Ganancia

La definición de ganancia es similar a la definición de directividad anteriormente dada, pero la comparación no se establece con la potencia radiada, si no con la potencia entregada a la antena. Por lo tanto, la ganancia y la directividad están relacionadas por la eficiencia de la antena.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} = \eta D(\theta, \varphi) \quad (2.19)$$

Este concepto de ganancia no debe confundirse con el que solemos trabajar en el caso de amplificadores, ya que la antena es un dispositivo pasivo y, por lo tanto, no amplifica la señal. En el mejor de los casos, una antena radiará con una eficiencia del 100 %.

2.4.8. Polarización

Se define la polarización como la dirección en la que la antena radia el máximo de potencia. La polarización de la onda radiada varía con la dirección respecto al centro de la antena, por lo que diferentes partes del diagrama de radiación pueden tener diferentes polarizaciones.

Se pueden definir tres tipos distintos de polarización, lineal, circular y elíptica:

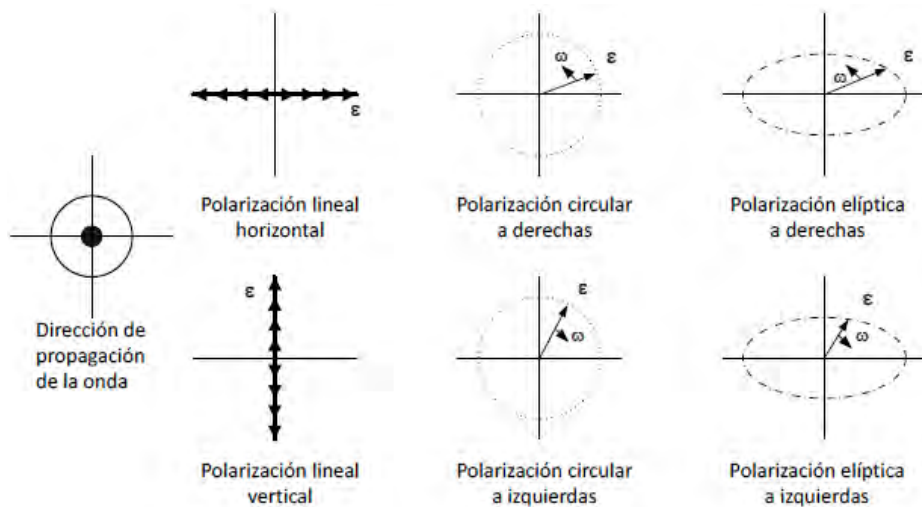


Figura 2.5: Tipos de polarización

Capítulo 3

Diseño de una antena de ranura

3.1. Características generales

Para comenzar el diseño de nuestro array de antenas, se debe comenzar diseñando exclusivamente una antena de ranura, para posteriormente a partir de ésta poder crear el array deseado.

Como ya se ha comentado anteriormente, para realizar este diseño se va a utilizar el programa CST MWS, haciendo uso de su simulador Transient Solver.

Inicialmente se debe crear un nuevo proyecto, para ello tras abrir la aplicación, se debe seleccionar “Create Project” en el apartado “New Project” y posteriormente elegir el área de aplicación y seleccionar uno de los flujos de trabajo, en este caso, se selecciona el área “MW and RF and Optical” y el flujo de trabajo de “Antennas”.

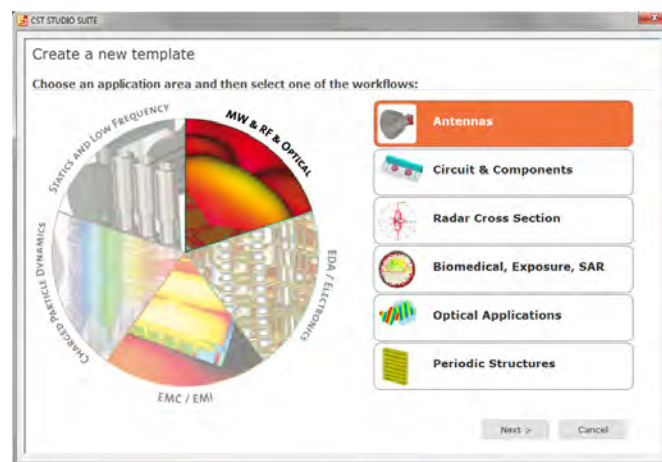


Figura 3.1: Menú Creación de Proyecto

Posteriormente, se debe crear una nueva plantilla (Template), para ello se escoge la opción “Wire” y posteriormente Time Domain para simular en el dominio del tiempo. En el siguiente paso, se seleccionan las dimensiones se medirán en milímetros (mm) y la frecuencia en GHz.

Respecto a la configuración, en este caso, se escoge una frecuencia mínima de 20 GHz y una frecuencia máxima de 36 GHz, y se selecciona un Monitor de Farfield, únicamente en la frecuencia de 28 GHz, ya que es la frecuencia a la que se va a trabajar. Después de realizar esta configuración se finaliza la creación del proyecto.

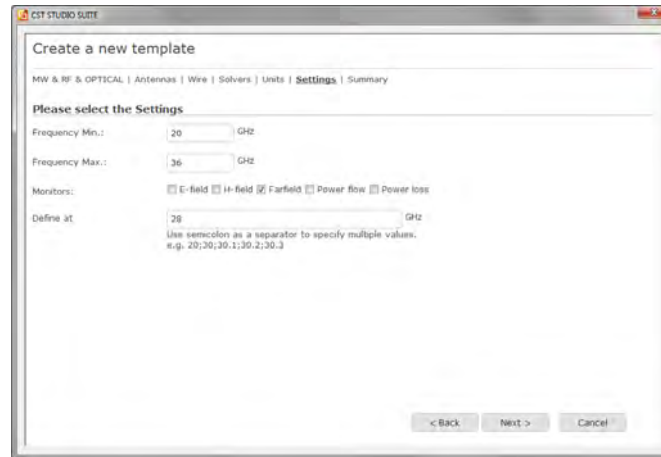


Figura 3.2: Menú Creación de Plantilla

Finalmente, antes de comenzar a diseñar nuestra antena se procede a cambiar las condiciones de contorno para evitar que nuestra antena radie “hacia atrás”, para ello se debe cambiar el menú superior a la opción “Simulation” y seleccionar el apartado “Boundaries” o condiciones de contorno de la sección de ajustes. Al seleccionar esta opción nos aparecerá una nueva pestaña que nos permitirá cambiar nuestras condiciones de contorno.

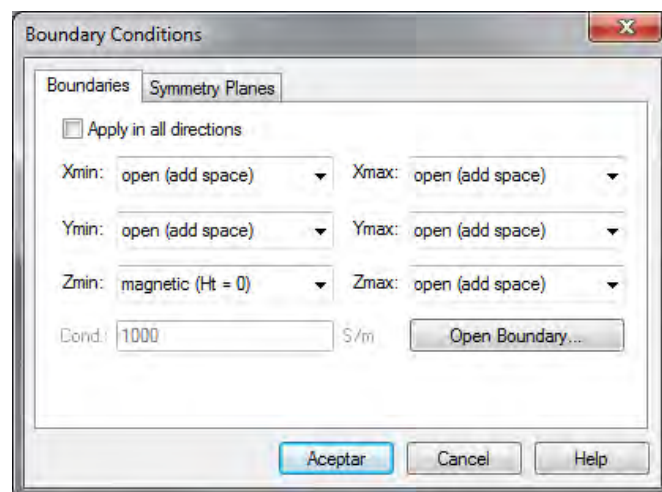


Figura 3.3: Menú Condiciones de Contorno (Boundaries)

En esta ventana, únicamente se debe cambiar el campo de Z_{min} , seleccionando como nueva opción: magnetic ($H_t = 0$), evitando que nuestra antena radie hacia atrás. Esta configuración inicial se volverá a cambiar cuando se realice el diseño de un array de pines que llevará a cabo la misma función, como ya se detallará en el capítulo 7.

3.2. Diseño

Para comenzar el diseño, primero se definen los distintos parámetros que utilizaremos, con sus respectivos valores iniciales. Para ello, se debe seleccionar “new parameter” en la lista de parámetros (parameter list) para cada nueva variable que creamos e introducir su nombre y valor, también se puede añadir una breve descripción del parámetro si lo deseamos. Los parámetros iniciales que creamos en este primer diseño son los siguientes:

Frecuencia central	f	-	28 GHz
Longitud de onda	λ	$\frac{3}{f} \frac{100}{\sqrt{3.38}}$	5.8278 mm
Dimensión horizontal antena	A	2λ	11.6556 mm
Dimensión vertical antena	B	2λ	11.6556 mm
Grosor sustrato	h	-	0.5 mm
Anchura ranura	W_r	0.1λ	0.5827 mm
Longitud ranura	L_r	0.5λ	2.9139 mm
Anchura línea transmisión	W_l	-	2 mm
Longitud línea transmisión	L_l	$\frac{B}{2}$	5.8278 mm

Tabla 3.1: Parámetros iniciales de la antena

Se define la frecuencia central a 28 GHz, ya que es la frecuencia a la que queremos trabajar. El valor de λ viene dado por la formula: $\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}}$, donde $\epsilon_r = 3.38$ debido al sustrato elegido.

En este proyecto vamos a utilizar el sustrato Rogers RO4003C, que como se ha comentado anteriormente presenta un permitividad eléctrica de 3.38. Mientras que para el resto de metales y líneas se utilizará un conductor eléctrico perfecto (PEC).

Posteriormente a la definición de las variables que se utilizarán en la antena, se procede a la creación de los componentes que la forman. Para ello, se debe cambiar el menú superior a “Modulation” y seleccionar “Brick” en la sección de formas (Shapes), con lo que aparecerá la siguiente ventana:

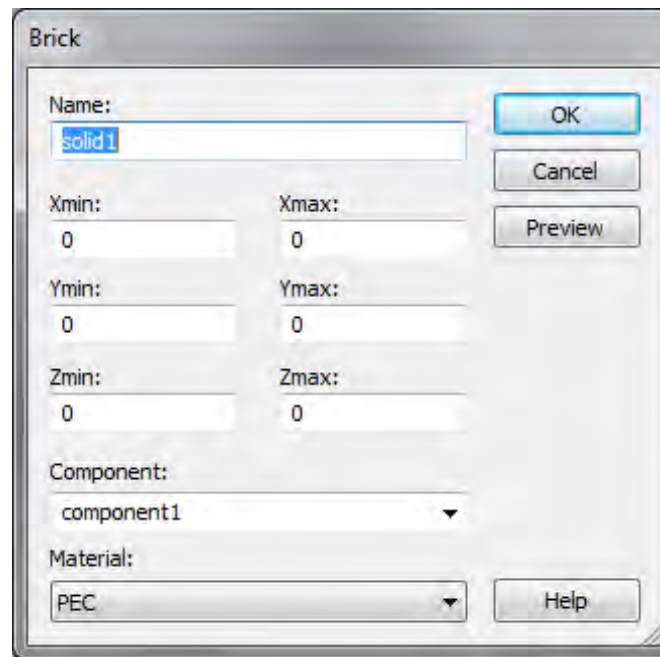


Figura 3.4: Menú Creación de Brick

Esta ventana se debe rellenar haciendo uso de los distintos parámetros definidos anteriormente, con las diferentes opciones que correspondan en cada caso; un nombre que identifique el componente, las diferentes dimensiones que posee y su material.

En nuestro caso, los componentes que forman nuestra antena son los siguientes:

- **Sustrato:** Como ya se ha comentado anteriormente nuestro sustrato será del material Rogers RO4003C, en este caso sin pérdidas, que posee una permitividad eléctrica $\epsilon_r = 3.38$. Nuestro sustrato tendrá un ancho de $A=11.65$ mm, un alto de $B=11.65$ mm y un grosor/espesor de $h=0.5$ mm, definiendo su forma de la siguiente manera:

X_{min}	$-\frac{A}{2}$	X_{max}	$\frac{A}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B}{2}$	Y_{max}	$\frac{B}{2}$
Z_{min}	-h	Z_{max}	0

Tabla 3.2: Parámetros iniciales de sustrato

- **Metal:** Nuestro metal estará formado por un metal PEC (Conductor Eléctrico Perfecto) que lógicamente tendrá el mismo ancho y alto que el sustrato anteriormente definido, pero en este caso su espesor será nulo.

X_{min}	$-\frac{A}{2}$	X_{max}	$\frac{A}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B}{2}$	Y_{max}	$\frac{B}{2}$
Z_{min}	0	Z_{max}	0

Tabla 3.3: Parámetros iniciales de metal

- **Ranura:** Nuestra ranura estará formada por el mismo material que nuestro metal PEC e igualmente no tendrá ningún espesor. Dicha ranura se define de manera horizontal por lo que tendrá las siguientes dimensiones: W_r de ancho y L_r de largo.

X_{min}	$-\frac{L_r}{2}$	X_{max}	$\frac{L_r}{2}$
Y_{min}	$-\frac{W_r}{2}$	Y_{max}	$\frac{W_r}{2}$
Z_{min}	0	Z_{max}	0

Tabla 3.4: Parámetros iniciales de ranura

Después de la definición de la ranura, se debe proceder a combinarla con el metal para realmente conseguir que nuestro metal tenga una apertura. Para ello se debe seleccionar el metal en el árbol de navegación que aparece en la izquierda de la pantalla, posteriormente se selecciona la opción “Subtract” de la sección “Boolean” y finalmente se escoge la ranura creada, consiguiendo así el diseño de nuestra ranura.

- **Línea de transmisión:** Nuestra línea de transmisión estará formada por un PEC que partirá desde el borde inferior de nuestra antena hasta el centro de la misma. En un principio se definirá dicha línea (situada debajo del sustrato) sin espesor, aunque este valor se cambiará posteriormente cuando se comience el diseño de nuestro array en el capítulo 5.

X_{min}	$-\frac{W_l}{2}$	X_{max}	$\frac{W_l}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B}{2}$	Y_{max}	$-\frac{B}{2} + L_l$
Z_{min}	-h	Z_{max}	-h

Tabla 3.5: Parámetros iniciales de línea de transmisión

Tras la creación de nuestros componentes se obtiene la figura inicial de nuestra antena.

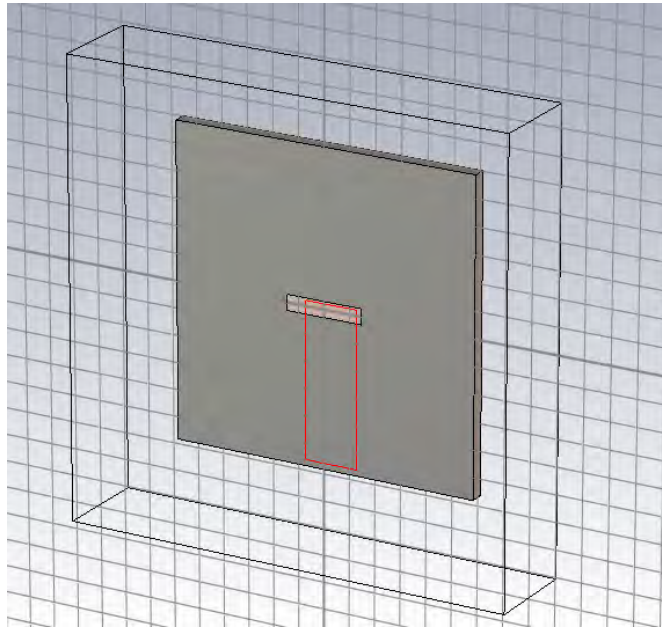


Figura 3.5: Figura antenna inicial

En la siguiente figura se pueden ver más claramente la forma y dimensiones de las distintas superficies de la antenna, donde en la cara frontal se puede observar las dimensiones de la línea de transmisión en comparación con el tamaño de la ranura y de la antenna, e igualmente en la cara lateral se puede ver el pequeño grosor que posee nuestra antenna.

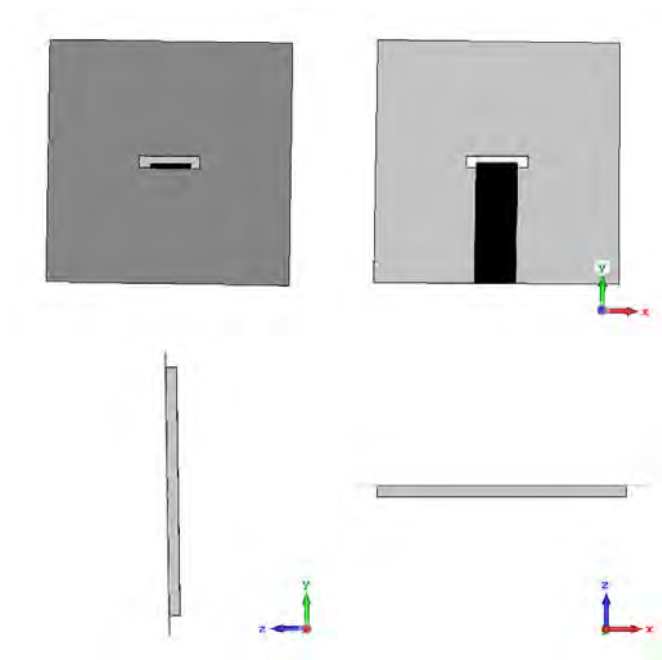


Figura 3.6: Figura antenna inicial por caras

Para finalizar el diseño, se crea el puerto que medirá los resultados obtenidos. Este puerto lógicamente estará situado en el borde donde comienza la línea de transmisión.

Para la creación de dicho puerto se debe seleccionar la opción “Waveguide Port” del menú “Simulation”, con lo que aparecerá una nueva ventana, completada por unos valores por defecto que se deben variar.

Se debe seleccionar el puerto en Y de orientación positiva y variar la posición del puerto por los siguientes valores:

X_{min}	$-1.5W_l$	X_{max}	$1.5W_l$
Z_{min}	$-2h$	Z_{max}	0
Y_{pos}	$-\frac{A}{2}$		

Tabla 3.6: Parámetros iniciales del puerto

Tras realizar todos estos cambios, se obtiene la siguiente ventana:

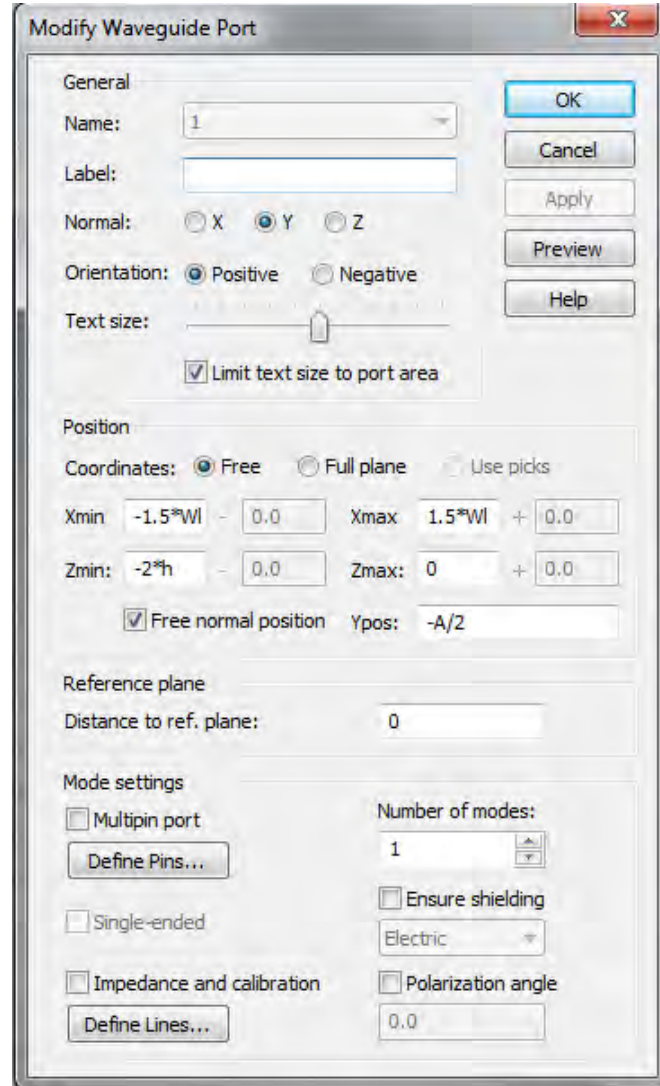


Figura 3.7: Figura puerto de antena inicial

Con la configuración de este puerto se concluye la creación y configuración de nuestra antena inicial y se procede a realizar la simulación.

3.3. Optimización de parámetros y resultados

Tras finalizar el diseño y configuración de nuestra antena, se procede a realizar la primera simulación, para ello simplemente se selecciona “Setup Solver”, que realiza la simulación en función del dominio del tiempo, ya que así se ha configurado anteriormente.

Como ya se comentó anteriormente en la sección 1.2 del capítulo 1 se pretende conseguir que nuestra antena radie a una frecuencia de 28 GHz y que la red de alimentación tenga una impedancia característica de 50

Ohmios.

Al finalizar la simulación, se pueden ver los distintos resultados en el árbol de navegación en la izquierda de la pantalla.

Se puede observar como varía el coeficiente de reflexión del puerto S_{11} en función de la frecuencia:

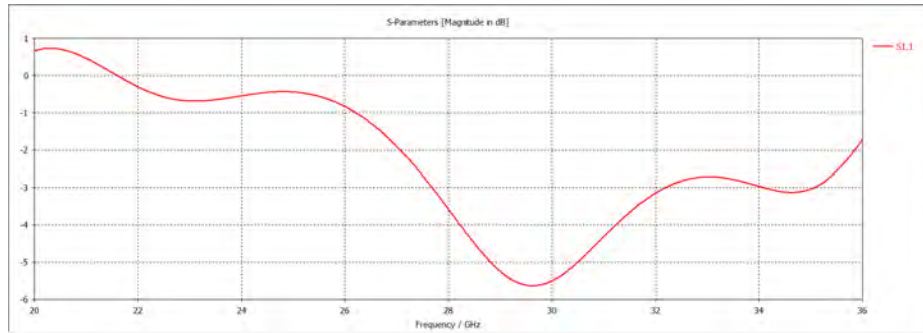


Figura 3.8: Parámetro S_{11} inicial

Igualmente podemos observar la impedancia característica que posee nuestra línea de transmisión.

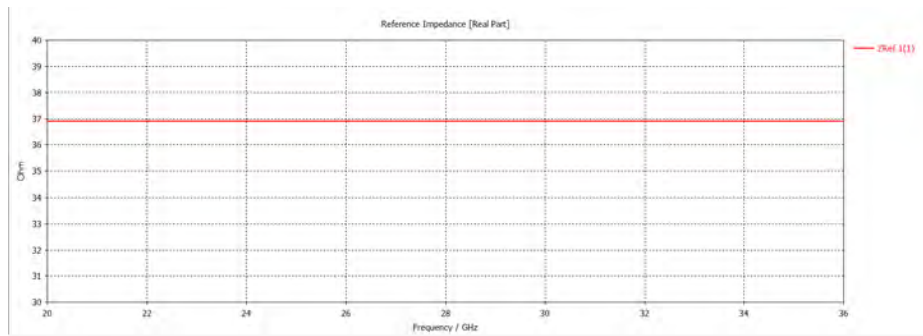


Figura 3.9: Impedancia característica de línea de transmisión inicial

Como se puede observar en la gráfica anterior, con esta configuración inicial se obtiene una impedancia característica de 37Ω aproximadamente. Para conseguir la impedancia deseada de 50Ω , se debe variar al ancho (W_l) de nuestra línea de transmisión, para ello, se debe disminuir la anchura de la línea, ya que como se sabe, si disminuye la anchura de una línea aumenta la impedancia característica de la misma.

En la siguiente tabla se pueden observar las distintas pruebas que se han llevado a cabo para conseguir la impedancia deseada de 50Ω :

$W_l = 2mm$	$Z_{ref} = 37 \Omega$
$W_l = 0.8mm$	$Z_{ref} = 65 \Omega$
$W_l = 1.3mm$	$Z_{ref} = 49.8 \Omega$
$W_l = 1.29mm$	$Z_{ref} = 50.0 \Omega$

Tabla 3.7: Pruebas anchura línea de transmisión

Finalmente, si se configura $W_l = 1.29mm$ se logra tener una línea con impedancia característica de 50Ω .

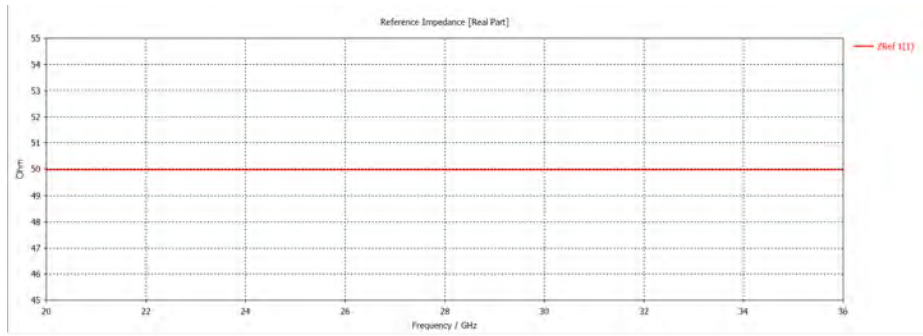
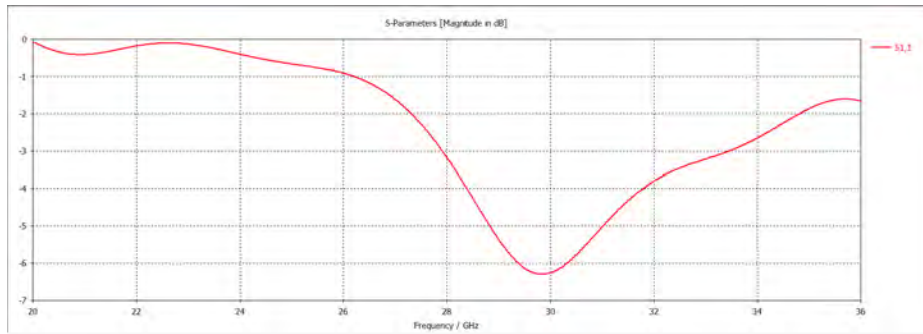


Figura 3.10: Impedancia característica de línea de transmisión

Con esta nueva configuración para la línea de transmisión, se obtiene el siguiente coeficiente de reflexión S_{11} :

Figura 3.11: Parámetro S_{11}

Como se puede ver en la figura, se obtienen unos -3 dB a 28 GHz y el mínimo de -6.3 dB se encuentra en torno a los 30 GHz y un ancho de banda BW=2 GHz a -5 dB. Como se pretende que nuestra antena nos proporcione el menor valor de S_{11} posible (habitualmente se pretende un valor menor a -10 dB), se debe variar de nuevo el diseño de nuestra antena.

En este caso, para conseguir un menor valor de S_{11} se tiene que variar la longitud de la línea, es decir, que nuestra línea de transmisión no debe llegar hasta el centro de la antena, sino tener un tamaño inferior y moverse desde el borde inferior de la antena hasta una zona intermedia de la misma, para ello se varia el parámetro L_l .

Para la obtención de este nuevo valor del parámetro L_l , se va a hacer uso del Optimizador. Esta herramienta nos permite variar el valor de un parámetro entre 2 rangos (superior e inferior) de manera que el programa calcula el valor de dicho parámetro que mejor se ajusta y mejor resultados ofrece dependiendo de una determinada “meta” que se le ha configurado previamente.

En este caso, se configura el parámetro L_l de forma que su mínimo es 2 mm y su máximo es 5.8278 mm (el valor con el que la línea llegaría hasta el centro de la antena) y además se crea el objetivo (Goal), pretendiendo que el parámetro S_{11} sea inferior a -10 dB en un rango de frecuencias entre los 27.5 GHz y los 28.5 GHz.

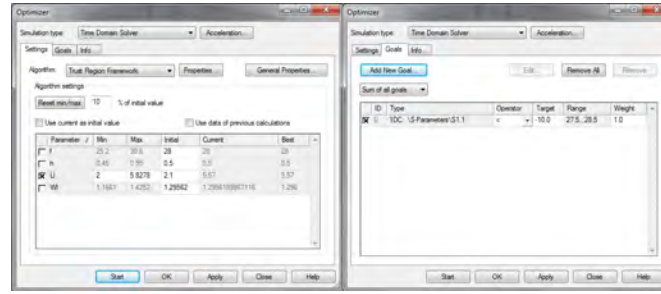
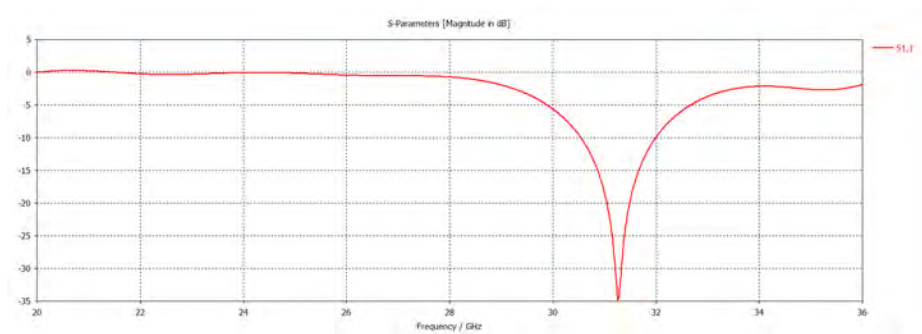


Figura 3.12: Configuración de optimizador para la antena inicial

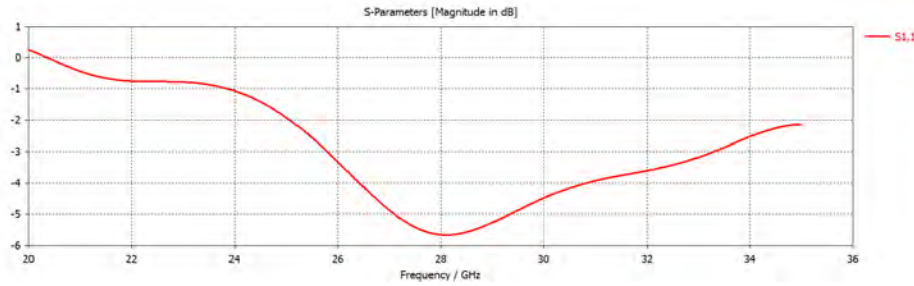
Tras finalizar la simulación realizada con el optimizador, se obtienen los siguientes resultados:

- Como el optimizador variaba el valor del parámetro L_l para obtener la mejor solución, se concluye que para obtener dichos resultados se utiliza $L_l = 5.57mm$.
- Tras realizar la ultima simulación, como no se ha cambiado el valor del ancho de la línea de transmisión, el valor de la impedancia característica de dicha línea no varía, por lo que el resultado sigue siendo $Z_{ref} = 50 \Omega$.
- Utilizando el valor de L_l que mejor resultados ofrece, se obtiene el siguiente coeficiente de reflexión S_{11} :

Figura 3.13: Parámetro S_{11}

Como se puede ver, se obtiene un valor mínimo de $\Gamma = -35$ dB a los 31.25 GHz aproximadamente. También se puede observar que a los 28 GHz (nuestra frecuencia de trabajo), con esta configuración solamente se obtienen -0.7 dB, por lo tanto, con este diseño la antena no funciona a 28 GHz. Por ello, se vuelve a realizar una nueva optimización variando el tamaño de la ranura, con lo que se obtienen los siguientes resultados:

- Ahora se obtiene una ranura de tamaño $W_r = 0.23\lambda = 1.34mm$ y $L_r = 0.5\lambda = 2.91mm$.
- La impedancia característica sigue siendo $Z_{ref} = 50\Omega$.
- Se obtiene el siguiente coeficiente de reflexión S_{11} :

Figura 3.14: Parámetro S_{11}

En este caso, se obtienen -5.5 dB a 28 GHz. Con esta configuración la antena tiene muchas pérdidas, pero al menos radia a la frecuencia deseada. Para mejorar dicha antena, minimizar las pérdidas y aumentar su directividad, en el próximo capítulo se mejorará su diseño y se creará una antena de ranura de banda ancha.

- Para concluir, con esta misma configuración se obtiene el siguiente diagrama de radiación:

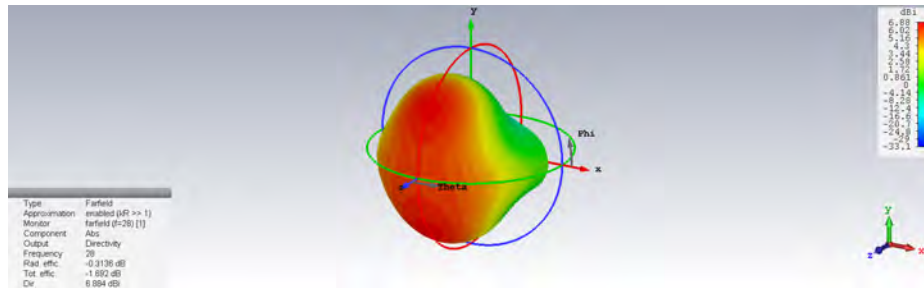


Figura 3.15: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 6.88 dB.

Este mismo diagrama de radiación se puede ver en un plano de 2 dimensiones, manteniendo fija la variable ϕ y observando el resultado en función de θ .

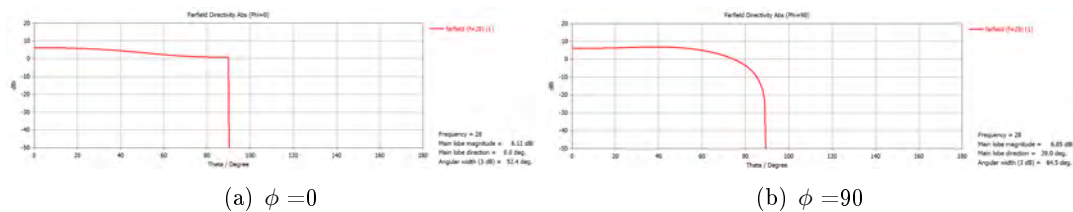


Figura 3.16: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

Con esta configuración, se puede observar tanto en el plano XZ como en el plano YZ, que en el diagrama de radiación actual únicamente se obtiene un lóbulo principal, sin la aparición de ningún lóbulo lateral.

Por ultimo, también se puede ver el diagrama de radiación en coordenadas polares, manteniendo fija la variable ϕ y observando el resultado en función de θ .



Figura 3.17: Diagrama de radiación de la antena en polares

Se puede observar que en ambos casos, únicamente se obtiene un lóbulo principal, sin la aparición de ningún lóbulo lateral, al igual que ocurría en los planos XZ e YZ en coordenadas cartesianas.

3.4. Conclusiones

En este capítulo se han diseñado y configurado los distintos parámetros para conseguir una antena de ranura que radie a la frecuencia de 28 GHz.

Para ello, después de crear nuestra antena con unos valores iniciales y posteriormente optimizar los resultados, se consigue nuestro objetivo.

Debido a estos cambios, se han conseguido obtener una impedancia característica $Z_{ref} = 50 \Omega$, un coeficiente de reflexión $S_{11} = -5.5dB$ y una directividad de casi 7 dB.

Capítulo 4

Diseño de antena de ranura de banda ancha

4.1. Características generales

En el este capítulo se va a realizar el diseño de una antena de ranura de banda ancha, continuando el diseño de la antena diseñada en el capítulo 3.

Para ello, se crearán nuevos parámetros con el fin de cambiar el diseño de la antena de ranura anterior, optimizando dichas variables y consiguiendo los resultados esperados.

4.2. Diseño

Para comenzar el diseño de este capítulo, primero se definen los parámetros que se utilizarán posteriormente, con sus respectivos valores iniciales, siguiendo los mismos pasos que en la sección 3.2 del capítulo anterior 3.

Los nuevos parámetros que se crean para la realización de este diseño son los siguientes:

Anchura línea transmisión vertical	W_{l2}	0.05λ	0.2913 mm
Posición línea transmisión vertical respecto centro ranura	V_c	$\frac{W_r - W_{l3}}{4}$	0.0728 mm
Anchura línea transmisión horizontal	W_{l3}	0.05λ	0.2913 mm
Longitud línea transmisión horizontal	L_{l3}	0.3λ	1.7483 mm

Tabla 4.1: Nuevos parámetros de la antena de banda ancha

La anchura de ambas líneas de transmisión será menor a la anchura de la línea ya existente, siendo en el caso de la línea horizontal inicialmente de la mitad del valor de la anchura de la ranura ($W_{l3} = \frac{W_r}{2}$).

Para la línea de transmisión vertical, no es necesario crear un parámetro de longitud, ya que esta dependerá de otras variables, como se explicará en detalle durante la creación de la misma. Una de esas variables, será V_c , que en este caso se crea con un valor inicial inferior a su limite superior, marcado por $W_r - W_{l3}$. Mientras que para la línea horizontal, simplemente se configura con una longitud inferior a la de la ranura.

Posteriormente a la definición de los nuevos parámetros que se utilizarán para conseguir la antena de ranura de banda ancha, se crean las 2 líneas de transmisión adicionales para conseguir dicho propósito, manteniendo el resto de parámetros y componentes ya existentes su mismo valor.

- **Línea 2 (Línea de transmisión vertical):** Esta línea de transmisión tendrá las mismas propiedades (material y espesor) que la línea ya existente. Dicha línea partirá desde la posición donde finaliza la línea existente hasta el borde de la ranura más el valor V_c , definiendo su forma de la siguiente manera:

X_{min}	$-\frac{W_{l2}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{l2}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B}{2} + L_l$	Y_{max}	$-\frac{W_r}{2} + V_c$
Z_{min}	-h	Z_{max}	-h

Tabla 4.2: Parámetros iniciales de línea de transmisión vertical

Como ya se ha comentado anteriormente, no es necesario ningún parámetro para configurar la longitud de esta línea, ya que se configura de tal forma que se crea desde la posición donde finaliza la anterior línea hasta el borde inferior de la ranura, añadiéndole un tramo a partir del borde de la ranura de la misma anchura y de la longitud de V_c .

Esta variable V_c define el posicionamiento de la línea de transmisión horizontal respecto al centro de la ranura, ya que dicha línea no tiene porque encontrarse posicionada en el centro de la misma, sino que puede encontrarse desplazada (hacia arriba o abajo), siempre y cuando la totalidad de la línea horizontal se encuentre dentro de los límites marcados por la ranura.

- **Línea 3 (Línea de transmisión horizontal):** Igual a las líneas existentes en lo que a material y espesor se refiere, esta línea se añadirá a partir de la posición donde acabo la línea anterior, pero al igual que la ranura, el lado largo de dicha línea se encuentra en la posición horizontal, como se define a continuación:

X_{min}	$-\frac{L_{l3}}{2}$	X_{max}	$\frac{L_{l3}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{W_r}{2} + V_c$	Y_{max}	$-\frac{W_r}{2} + V_c + W_{l3}$
Z_{min}	-h	Z_{max}	-h

Tabla 4.3: Parámetros iniciales de línea de transmisión horizontal

Tras la creación de nuestros componentes, se debe proceder a unir las nuevas líneas de transmisión a la ya existente, obteniendo así una única línea de transmisión.

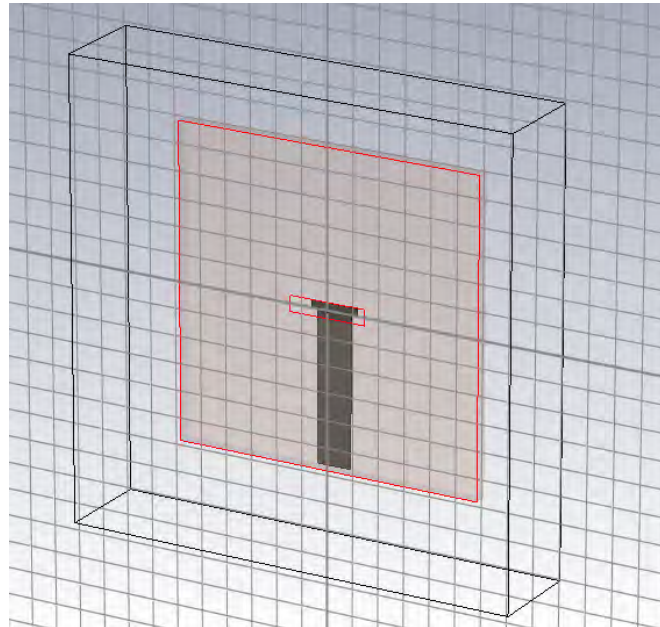


Figura 4.1: Figura antena de banda ancha inicial

Así, en la siguiente figura se pueden ver las diferencias entre la antena de ranura y la antena de ranura de banda ancha:

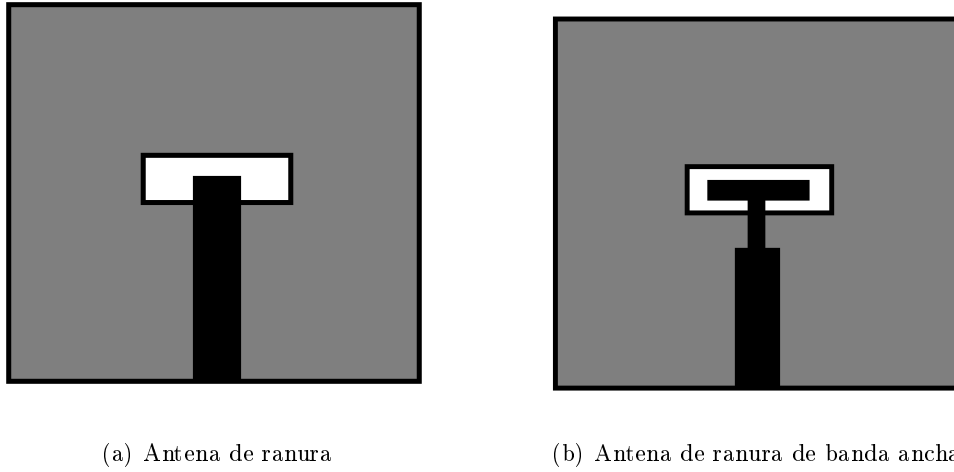


Figura 4.2: Comparación de figuras antena de ranura y antena de ranura de banda ancha

Con esta última configuración, se finaliza la creación de la antena de ranura de banda ancha y se procede a su simulación.

4.3. Optimización de parámetros y resultados

Tras finalizar el diseño de nuestra antena de banda ancha, se procede a realizar la simulación, donde se pueden ver los distintos resultados en el árbol de navegación en la izquierda de la pantalla.

Se puede ver como varía el coeficiente de reflexión del puerto S_{11} en función de la frecuencia:

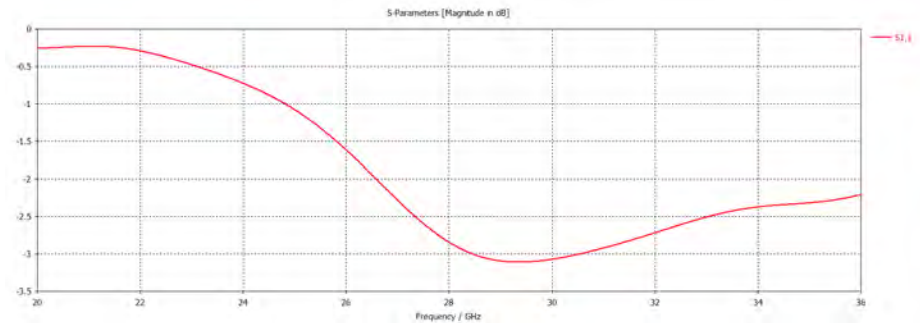


Figura 4.3: Parámetro S_{11}

Como se puede observar en este caso, con esta configuración solamente se consiguen - 3 dB, por lo que se debe proceder a variar el diseño inicial.

En el diseño actual existen varios parámetros que se pueden variar para comprobar si modifican el comportamiento de la antena y los resultados finales, por ello se realizan diversas pruebas para cotejar los resultados cuando se realizan dichas modificaciones:

- Variando la anchura de la línea vertical W_{l2} . Si este parámetro se hace más pequeño, el mínimo de S_{11} desciende hasta los -4.5 dB aproximadamente, pero desplazándose hacia frecuencias superiores (en torno los 30 GHz). Mientras que si se aumenta el valor de W_{l2} el resultado obtenido es peor.
- Variar el parámetro V_c no ofrece ningún cambio debido a su pequeño tamaño.
- Al variar la anchura de la línea horizontal W_{l3} ocurre lo mismo que al variar W_{l2} , obteniendo mejores resultados al disminuir el tamaño del mismo.

- Si se disminuye el valor del parámetro L_{l3} se obtienen -3 dB a frecuencias superiores (33-34 GHz), mientras que si se aumenta dicho valor, se consigue un resultado inferior a los -4 dB en frecuencias cercanas a los 28 GHz.
- Finalmente, también se puede modificar el parámetro de la longitud de la línea existente L_l calculado en el capítulo anterior 3. Así, no se considera que este valor pueda aumentar, ya que como se ve en la figura 4.1, esta línea tiene una longitud tan grande que dificulta diferenciar el diseño de la línea en su totalidad. Por lo tanto, se prueba una nueva simulación disminuyendo dicho valor L_l , obteniendo para el S_{11} que la antena radia con un Γ inferior y a una menor frecuencia.

Ninguna de las modificaciones realizadas en los parámetros seleccionados por separado produce diferencias significativas en los resultados, por lo que se procede a realizar la simulación utilizando el Optimizador proporcionado por el programa CST MWS.

En este caso, se configuran varios parámetros, como se puede observar en la tabla y gráfica adjuntas, y se pretende que el “Goal” consiga obtener un parámetro S_{11} inferior a -10 dB en un rango de frecuencias entre los 27.75 GHz y los 28.25 GHz.

L_l	Min=2 mm	Max=5.8 mm
L_{l3}	Min=1 mm	Max=8 mm
L_r	Min=2 mm	Max=8 mm
V_c	Min=0 mm	Max = $W_r - W_{l3}$
W_{l2}	Min=0.1 mm	Max=1.2 mm
W_{l3}	Min=0.1 mm	Max=1 mm
W_r	Min=0.4 mm	Max=1.2 mm

Tabla 4.4: Definición parámetros optimizador antena banda ancha

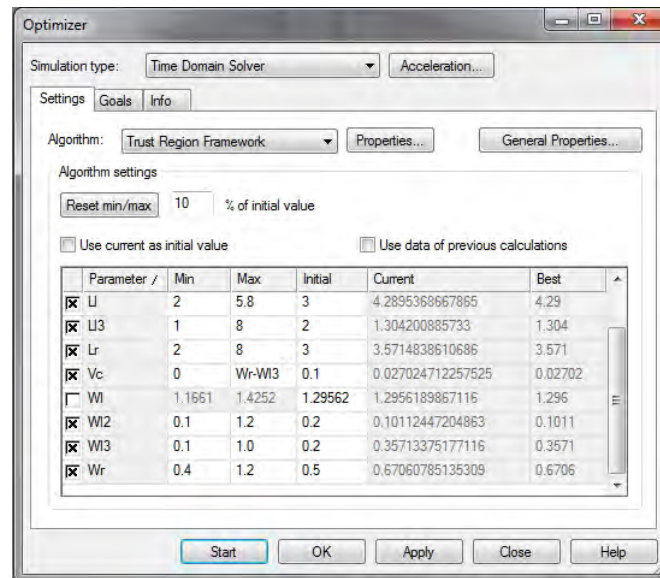


Figura 4.4: Optimizador antena banda ancha

Tras finalizar la simulación realizada con el optimizador, se obtiene los siguientes resultados:

- Los parámetros utilizados por el optimizador que ofrecen mejores prestaciones obtienen el siguiente valor final:

L_l	4.28 mm
L_{l3}	1.30 mm
L_r	3.57 mm
V_c	0.02 mm
W_{l2}	0.10 mm
W_{l3}	0.35 mm
W_r	0.67 mm

Tabla 4.5: Parámetros finales antena banda ancha

Con estos nuevos parámetros, se obtiene la siguiente figura:

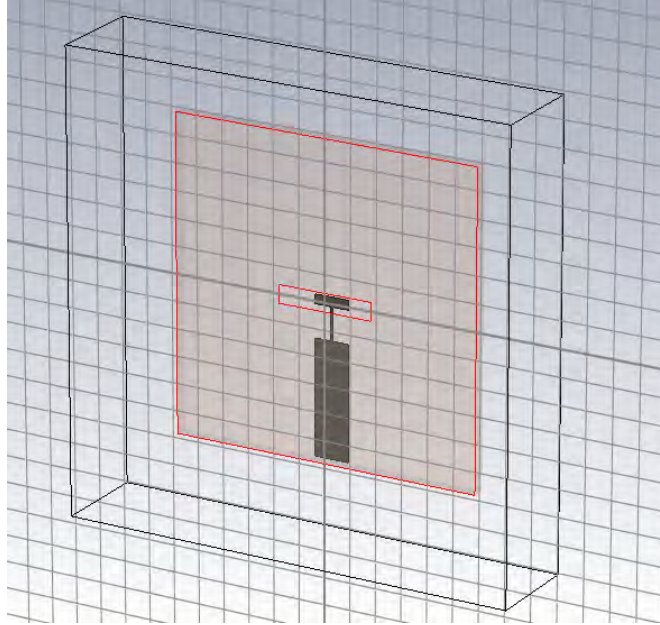


Figura 4.5: Figura antena de banda ancha

- Como la anchura de la línea principal ya existente anteriormente no varia ($W_l = 1.29mm$), lógicamente se sigue obteniendo una línea de impedancia característica de 50Ω , tal y como se quiere conseguir.

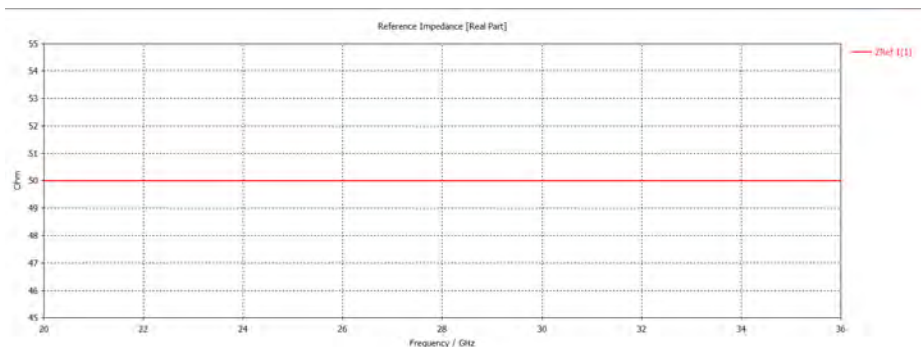
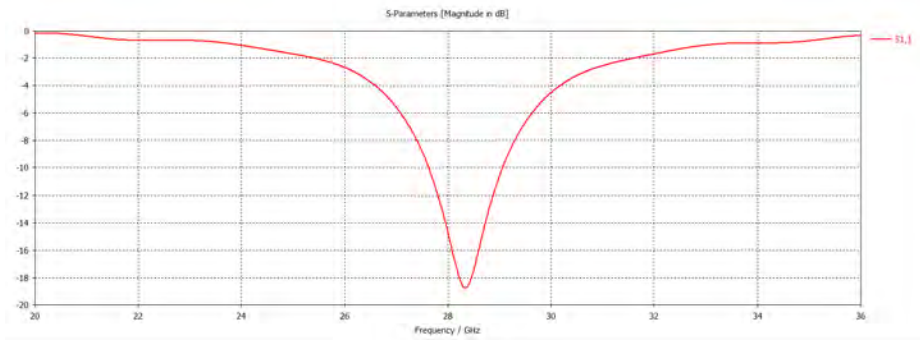


Figura 4.6: Impedancia característica de línea de transmisión

- Tras realizar la optimización se obtiene este nuevo coeficiente de reflexión S_{11} :

Figura 4.7: Parámetro S_{11}

Como se puede ver, se obtiene un valor mínimo de $\Gamma = -18$ dB a los 28.35 GHz aproximadamente y un ancho de banda de $BW=1.4$ GHz a -10 dB. También se puede observar que a los 28 GHz se logran -14.35 dB.

- Para concluir, con esta configuración se obtienen el siguiente diagrama de radiación:

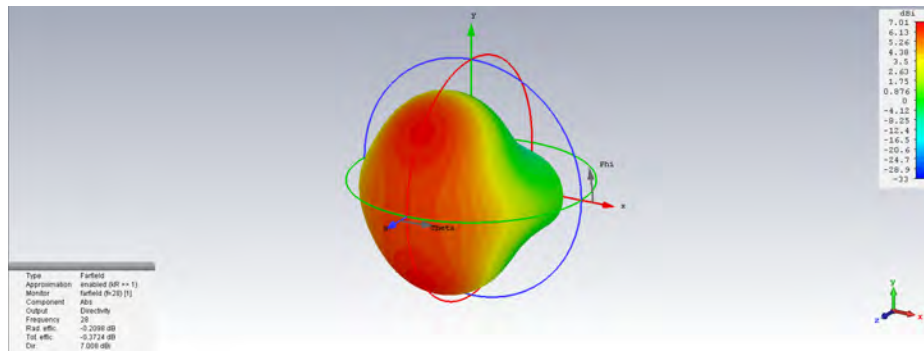


Figura 4.8: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 7.01 dB. Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

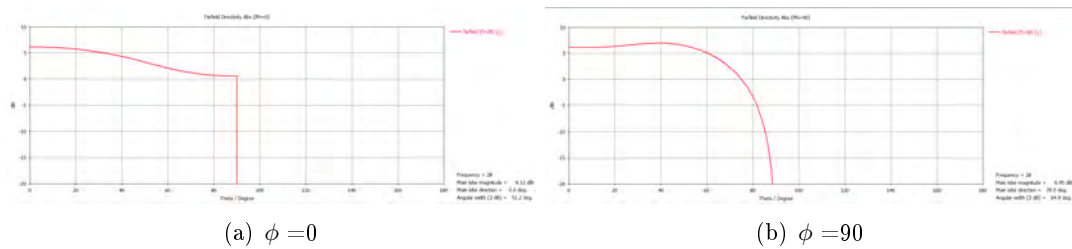


Figura 4.9: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

Como se puede observar tanto en el plano XZ como en el plano YZ, en el diagrama de radiación actual únicamente se obtiene un lóbulo principal que alcanza algo más de 6 dB, sin la aparición de ningún lóbulo lateral.

Por ultimo, al igual que en el capítulo anterior 3 también se observan los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares.



Figura 4.10: Diagrama de radiación de la antena en polares

Al igual que en el caso de la antena simple y los planos XZ e YZ, se obtiene un único lóbulo principal.

4.4. Conclusiones

En este capítulo se han diseñado y configurado los distintos parámetros para conseguir una antena de ranura de banda ancha que radie a la frecuencia de 28 GHz.

Para ello, después de añadir unas nuevas líneas de transmisión a la ya existente de nuestra antena, y de encontrar el valor óptimo de los parámetros que definen dichas líneas (y la ranura) que hacen que nuestra antena cumpla su objetivo, se ha conseguido obtener una impedancia característica $Z_{ref} = 50 \Omega$, un coeficiente de reflexión $S_{11} = -18dB$ y una directividad de 7 dB.

Capítulo 5

Diseño de la red de alimentación

5.1. Características generales

Tras finalizar el diseño de una única antena de ranura de banda ancha en el capítulo 4, se comienza el diseño del array formado por dichas antenas. Para ello, se deben diseñar redes divisoras de potencia que dividan de forma equitativa la potencia de entrada, para alimentar a todas las ranuras con la misma amplitud y fase y conseguir así que el array sea lo más directivo posible.

Para la creación de este divisor 1 a 64, se comienza diseñando un divisor 1 a 2 para a partir de este ir aumentando progresivamente el diseño, por un divisor 1 a 4, 1 a 8 y así sucesivamente, hasta diseñar el divisor 1 a 64 deseado. Para ello, se crean varias líneas de transmisión, todas de la misma anchura (manteniendo la anchura en las esquinas), y donde el diseño de dichas líneas (longitud y posición) varia según el divisor que se pretende diseñar.

Para realizar este diseño, se debe crear un nuevo proyecto en el programa CST MWS de la misma forma que se hizo anteriormente en la sección 3.1 del capítulo 3, y tras finalizar dicha creación del proyecto configurar las condiciones de contorno (*Boundaries*) al igual que se hizo en dicho capítulo, es decir, configurando Z_{min} como magnetic $H_t = 0$, evitando así que nuestra antena radie hacia atrás.

5.2. Divisor de 1 a 2

Como ya se ha comentando anteriormente en la sección 5.1 de este mismo capítulo, el diseño del divisor 1 a 64 comienza con el diseño de un divisor 1 a 2.

5.2.1. Diseño

Tras crear un nuevo proyecto, se comienza el diseño del divisor, para ello se definen los distintos parámetros que utilizaremos, tal como se hizo en la sección 3.2 del capítulo 3.

Como se va a crear un divisor 1 a 2, es decir, un paralelo entre las dos líneas, antes de la creación de estos parámetros se debe calcular la anchura de una línea adicional W_{la} de tramo $\lambda/4$ que introduciremos en el diseño.

Por lo tanto, como se quiere tener una impedancia de referencia de 50Ω en cada tramo de línea, el paralelo de estas líneas será de 25Ω , por lo que en este tramo de línea $\lambda/4$ adicional se debe conseguir una impedancia de $Z = \sqrt{25 \times 50} \simeq 35\Omega$.

Para calcular el valor de la anchura W_{la} que se debe utilizar, al igual que se hizo en la sección 3.2 del capítulo 3 se prueban diversas opciones, para obtener en este caso una impedancia de 35.35Ω . En este caso, se comprueba que esta impedancia de 35.35Ω se consigue con un tramo de línea de anchura $W_{la} = 2.12mm$.

Por lo tanto, finalmente, los parámetros que creamos para este primer diseño son los siguientes:

Frecuencia central	f	-	28 GHz
Longitud de onda	λ	$\frac{3}{f} \frac{100}{\sqrt{3.38}}$	5.8278 mm
Longitud de onda en espacio libre	λ_0	$\frac{3}{f} 100$	10.7142 mm
Dimensión horizontal divisor	A_t	$2(L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2})$	11.8670 mm
Dimensión vertical divisor	B_t	$L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2}$	5.9335 mm
Grosor sustrato	h	-	0.5 mm
Distancia entre líneas	d	$0.8 \lambda_0$	8.5714
Anchura línea transmisión	W_{lp}	-	1.2956 mm
Longitud línea transmisión principal	L_{lp}	$\frac{d - W_{lp} - (2L_{la})}{2}$	2.0469 mm
Longitud línea transmisión horizontal	L_{h2}	$d + W_{lp}$	9.8670 mm
Longitud línea transmisión vertical	L_{l2}	-	1 mm
Anchura línea transmisión adicional (tramo $\lambda/4$)	W_{la}	-	2.1212 mm
Longitud línea transmisión adicional (tramo $\lambda/4$)	L_{la}	$\lambda/4$	1.4569 mm
Espesor línea transmisión	Esp	-	0.0180 mm

Tabla 5.1: Parámetros iniciales divisor 1 a 2

Se define la frecuencia central a 28 GHz, ya que es la frecuencia a la que queremos trabajar. El valor de λ viene dado por la formula: $\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}}$, donde $\epsilon_r = 3.38$ debido al sustrato.

Las dimensiones del divisor se configuran de tal forma que no existan problemas y todas las líneas de transmisión se encuentren dentro de los límites marcados por las dimensiones del metal y del sustrato.

Se define una variable “d” que marcará la distancia entre las líneas y posteriormente entre las antenas. Se debe diseñar la variable “d” de tal forma que sea un valor lo suficientemente grande para que no se solapen las antenas y no haya problemas en el diseño de los tramos de línea, pero al mismo tiempo inferior a λ_0 para que no existan problemas de Grating Lobes (lóbulos no deseados). Por todo ello, se opta por configurar $d = 0.8\lambda_0$, aunque este valor se puede variar posteriormente si los resultados no son los esperados o existen problemas en el diseño.

Como ya se ha comentado anteriormente, todas los tramos de líneas de transmisión a excepción del tramo $\lambda/4$ deben tener la misma anchura para proporcionar una impedancia de 50Ω , por lo que solamente se crea un parámetro de anchura W_{lp} que se utilizara para la creación de dichos tramos.

El tramo de línea L_{lp} se diseña de tal forma para que en la sección posterior 5.3 no haya problemas a la hora de realizar el diseño y las salidas de los tramos de línea estén equidistantes (a una distancia “d”) de forma vertical.

Igualmente se realiza el diseño del parámetro L_{h2} , de forma que las salidas de los tramos de líneas estén a la misma distancia “d” en la horizontal, que es el caso que en este divisor nos ocupa.

La variable L_{l2} se define de 1 mm, ya que aunque podría tener un mayor tamaño (podría definirse de tamaño $\lambda/4$), se configura de 1 mm de longitud para que en los diseños posteriores no existan problemas de solapamiento entre las líneas y exista un pequeño espacio entre las mismas.

Se define el parámetro espesor, que marcará el grosor de la línea de transmisión, en este caso, nuestra línea tendrá un espesor de $18 \mu\text{m}$.

Posteriormente a la definición de las variables que se utilizaran en el diseño, se procede a la creación de los “Bricks” que forman el divisor 1 a 2, al igual que se hizo en el capítulo 3. En este caso, los componentes que forman nuestro divisor son los siguientes:

- **Sustrato:** Inicialmente se crea el sustrato de material Rogers RO4003C al igual que en el caso del capítulo 3, definiendo su forma de la siguiente manera:

X_{min}	$-\frac{A_t}{2}$	X_{max}	$\frac{A_t}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2}$	Y_{max}	$\frac{B_t}{2}$
Z_{min}	-h	Z_{max}	0

Tabla 5.2: Parámetros iniciales de sustrato

- **Metal:** Posteriormente se crea el metal formado por un PEC (Conductor Eléctrico Perfecto) que lógicamente tendrá el mismo ancho y alto que el sustrato anteriormente definido, pero en este caso su espesor será nulo.

X_{min}	$-\frac{A_t}{2}$	X_{max}	$\frac{A_t}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2}$	Y_{max}	$\frac{B_t}{2}$
Z_{min}	0	Z_{max}	0

Tabla 5.3: Parámetros iniciales de metal

- **Línea de transmisión:** La creación de la línea de transmisión se divide en varios tramos, todos ellos formados por un PEC. Se define dicha línea con un espesor $Esp=18 \mu m$, dividida en los siguientes tramos:

1. **Tramo línea transmisión 1: Tramo de línea principal 1**

X_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2}$	Y_{max}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.4: Tramo línea principal 1

2. **Tramo línea de transmisión 2: Tramo de línea adicional 1 de longitud $\lambda/4$**

X_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp}$	Y_{max}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.5: Tramo línea adicional

3. **Tramo línea de transmisión 3: Tramo horizontal 2**

X_{min}	0	X_{max}	$\frac{L_{h2}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la}$	Y_{max}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.6: Tramo línea horizontal 2

Tras crear esta línea se deben hacer los 2 *chamfers* necesarios para mantener la anchura en las esquinas, uno en la esquina inferior derecha y otro en la esquina superior izquierda de este tramo de línea.

4. **Tramo línea de transmisión 4: Tramo horizontal 3**

X_{min}	$-\frac{L_{h2}}{2}$	X_{max}	0
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la}$	Y_{max}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.7: Tramo línea horizontal 3

Al igual que en el caso del tramo de línea anterior, se realizan 2 *chamfers* (solamente cambian las posiciones del tramo de línea donde se realizan), uno en la esquina inferior izquierda y otro en la esquina superior derecha de esta línea, siguiendo los mismos pasos y utilizando los mismos valores, una anchura W_{lp} y un ángulo de 45° .

5. Tramo línea de transmisión 5: Tramo vertical 2

X_{min}	$\frac{L_{h2}}{2} - W_{lp}$	X_{max}	$\frac{L_{h2}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp}$	Y_{max}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.8: Tramo línea vertical 2

6. Tramo línea de transmisión 6: Tramo vertical 3

X_{min}	$-\frac{L_{h2}}{2}$	X_{max}	$-\frac{L_{h2}}{2} + W_{lp}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp}$	Y_{max}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.9: Tramo línea vertical 3

Tras finalizar la creación de todos los tramos de línea por separado, se deben unir en una sola línea de transmisión.

Tras la creación de todos los componentes se obtiene la figura inicial de nuestro divisor 1 a 2:

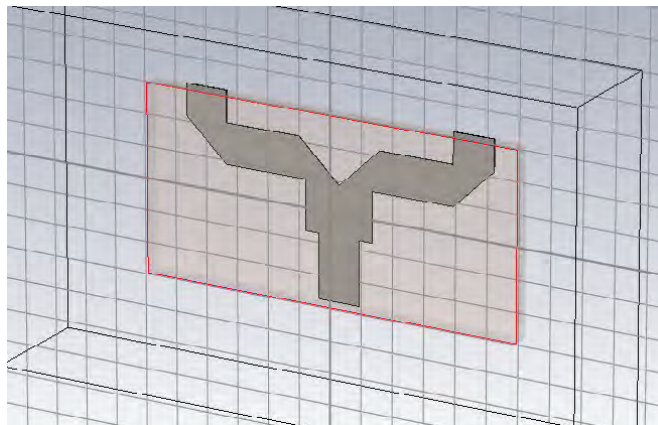


Figura 5.1: Figura divisor 1 a 2

Posteriormente a la obtención de la figura del divisor 1 a 2, se deben configurar los puertos, para ello, al igual que en la sección 3.2 del capítulo 3 se selecciona la opción “Waveguide Port” del menú “Simulation” en todos los casos necesarios.

En este caso, como se esta creando un divisor 1 a 2 se necesitan 3 puertos distintos:

1. **Puerto 1:** Se debe seleccionar el puerto en Y de orientación positiva.

2. **Puertos 2 y 3:** Se deben seleccionar en ambos casos, el puerto en Y de orientación negativa.

Tras configurar los puertos, se concluye la creación del divisor 1 a 2 y se puede realizar la primera simulación.

5.2.2. Optimización de parámetros y resultados

Al finalizar la simulación, se pueden ver los distintos resultados. Los parámetros S de los 3 puertos configurados S_{11} , S_{21} y S_{31} respecto a lo introducido por el puerto 1 en función de la frecuencia son:

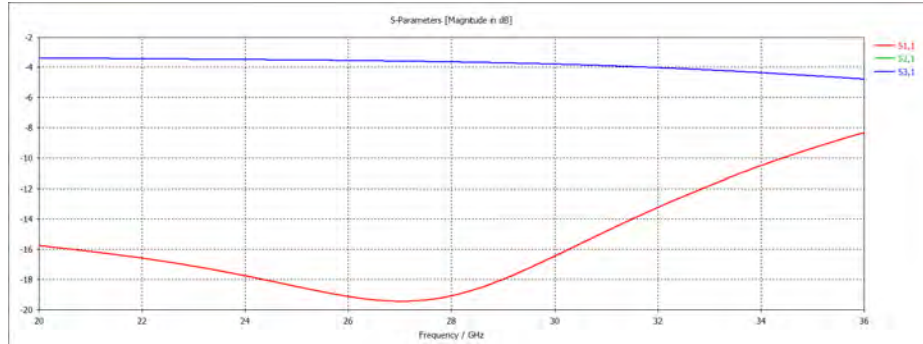


Figura 5.2: Parámetros S del divisor 1 a 2

Como se puede ver, los resultados son bastante buenos, ya que parece ser que el puerto 1 está adaptado y los parámetros $S_{21} = S_{31} \simeq -3$ dB, tal y como se esperaba.

Posteriormente, se realizan varias pruebas variando el valor del parámetro L_{la} ; primero se prueba el nuevo diseño utilizando $L_{la} = 0.9\lambda/4$, obteniendo peores resultados, ya que para el parámetro S_{11} solamente se obtienen -16 dB y posteriormente se comprueba con el valor $L_{la} = 1.1\lambda/4$, con el que se obtienen mejores resultados que en el caso anterior, ya que se alcanzan los -18 dB.

Ninguna de estas pruebas es concluyente, y como se pretende conseguir que el puerto 1 esté lo más adaptado posible, se optimiza el parámetro L_{la} entre los límites $0.9\lambda/4$ (ya que para valores menores los resultados son peores), y $1.2\lambda/4$, obteniendo que la mejor solución se obtiene cuando $L_{la} = 1.09\lambda/4 = 1.59\text{mm}$.

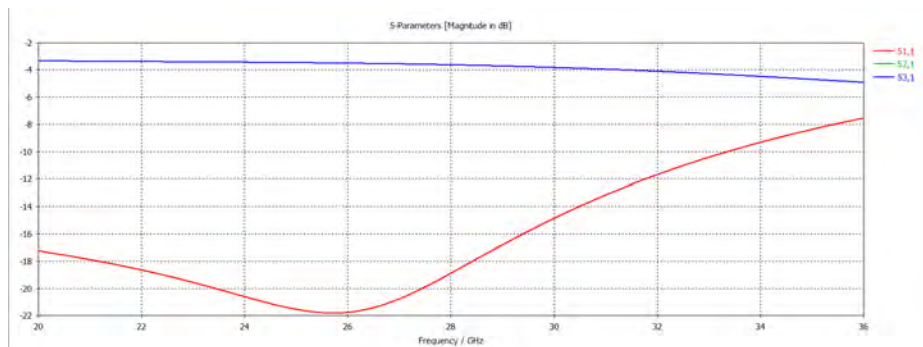


Figura 5.3: Parámetros S del divisor 1 a 2

Como se puede ver, las diferencias con los parámetros S obtenidos inicialmente son mínimas. El parámetro S_{11} anteriormente tenía el mínimo a los 27 GHz y ahora presenta su mínimo a 26 GHz, obteniendo además en ambos casos -19 dB en los 28 GHz. Por otro lado, los parámetros S_{21} y S_{31} no han variado con respecto al caso anterior, siendo casi constantes a -3 dB a excepción de su ligero descenso a partir de los 32 GHz.

Igualmente, con esta nueva configuración, se han obtenido las siguientes impedancias:

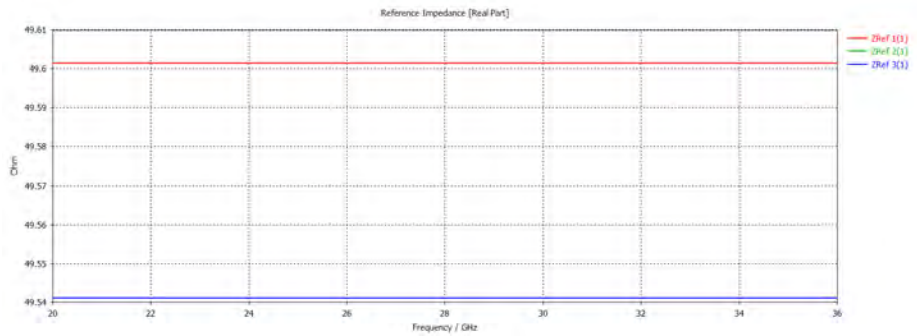


Figura 5.4: Impedancias características línea de transmisión de divisor 1 a 2

Se puede observar que los valores de las impedancias descienden un poco hasta los 49.6Ω , pero estos se consideran valores aceptables.

Por lo tanto, se puede concluir que el diseño realizado es óptimo para continuar a la siguiente etapa y diseñar un divisor 1 a 4.

5.3. Divisor de 1 a 4

Tras diseñar el divisor 1 a 2 se puede comenzar el diseño del divisor 1 a 4, consiguiendo así diseñar la red de alimentación para un posible array de antenas de ranura 2×2 .

5.3.1. Diseño

Este divisor 1 a 4 se crea a partir del divisor 1 a 2 creado en la sección anterior 5.2. Para ello, inicialmente se crean y definen los nuevos parámetros que utilizaremos en este nuevo divisor aparte de los ya existentes. Los nuevos parámetros son los siguientes:

Dimensión horizontal divisor	A_t	$2(\frac{W_{lp}}{2} + L_{la2} + L_{lp2})$	17.1428 mm
Dimensión vertical divisor	B_t	$2(L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2})$	11.8670 mm
Longitud línea transmisión adicional 2 (tramo $\lambda/4$)	L_{la2}	$\lambda/4$	1.4569 mm
Longitud línea transmisión principal 2	L_{lp2}	$d - L_{la2} - \frac{W_{lp}}{2}$	6.6597 mm

Tabla 5.10: Parámetros iniciales divisor 1 a 4

Las dimensiones del divisor se vuelven a definir (cambiando su valor) ya que el tamaño del divisor se verá aumentado. Realizando este cambio se consigue que todas las líneas de transmisión se encuentren dentro de los límites marcados por las dimensiones del metal.

Para los nuevos tramos de línea no es necesario crear las variables que definan su anchura, ya que tendrán la misma anchura que las líneas anteriores (de la misma forma, la nueva línea adicional tendrá la misma anchura que la línea adicional ya existente).

Se crea la variable L_{lp2} de forma que al ampliar el diseño al siguiente divisor 1 a 8 las salidas de los tramos de línea de ese divisor estén equidistantes con las actuales.

Tras crear los nuevos parámetros y antes de crear nuevos tramos de línea se deben modificar los tramos ya existentes para centrar el diseño. Para ello, se debe variar el diseño de forma que se cambian todas las definiciones de estos componentes, pero solamente se varía su posición en Y, quedando los tramos de línea en Y definidos de la siguiente forma:

Tramo línea principal 1	Y_{min}	0	Y_{max}	L_{lp}
Tramo línea adicional 1	Y_{min}	L_{lp}	Y_{max}	$L_{lp} + L_{la}$
Tramos líneas horizontales 2 y 3	Y_{min}	$L_{lp} + L_{la}$	Y_{max}	$L_{lp} + L_{la} + W_{lp}$
Tramos líneas verticales 2 y 3	Y_{min}	$L_{lp} + L_{la} + W_{lp}$	Y_{max}	$L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2}$

Tabla 5.11: Nueva definición tramos de línea existentes divisor 1 a 4

Tras la definición de las nuevas variables y la redefinición de algunos parámetros del diseño, se procede a la creación de los “Bricks” que forman el divisor 1 a 4, al igual que se hizo en la subsección 5.2.1.

En este caso, solamente se deben crear nuevos tramos de línea de transmisión:

1. **Tramo línea transmisión 1: Tramo de línea principal 1.2 simétrica a la principal ya existente**

X_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Y_{min}	$-L_{lp}$	Y_{max}	0
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.12: Tramo línea principal 1.2

Al igual que ocurre en el tramo de línea principal ya existente, en este tramo de línea también se debe realizar un *chamfer* en la esquina superior izquierda.

2. **Tramo línea de transmisión 2: Tramo de línea adicional 1.2 simétrica a la existente**

X_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Y_{min}	$-L_{lp} - L_{la}$	Y_{max}	$-L_{lp}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.13: Tramo línea adicional 1.2

3. **Tramo línea de transmisión 3: Tramo horizontal 4**

X_{min}	0	X_{max}	$\frac{L_{h2}}{2}$
Y_{min}	$-L_{lp} - L_{la} - W_{lp}$	Y_{max}	$-L_{lp} - L_{la}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.14: Tramo línea horizontal 4

Tras crear esta línea, se deben hacer los 2 *chamfers* necesarios para mantener la anchura en las esquinas inferior izquierda e inferior derecha.

4. **Tramo línea de transmisión 4: Tramo horizontal 5**

X_{min}	$-\frac{L_{h2}}{2}$	X_{max}	0
Y_{min}	$-L_{lp} - L_{la} - W_{lp}$	Y_{max}	$-L_{lp} - L_{la}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.15: Tramo línea horizontal 5

Al igual que en el caso del tramo de línea horizontal 4, se realizan 2 *chamfers* en las esquinas inferiores del tramo de línea horizontal 5.

5. Tramo línea de transmisión 5: Tramo vertical 4

X_{min}	$\frac{L_{h2}}{2} - W_{lp}$	X_{max}	$\frac{L_{h2}}{2}$
Y_{min}	$-L_{lp} - L_{la}$	Y_{max}	$-L_{lp} - L_{la} + L_{l2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.16: Tramo línea vertical 4

6. Tramo línea de transmisión 6: Tramo vertical 5

X_{min}	$-\frac{L_{h2}}{2}$	X_{max}	$-\frac{L_{h2}}{2} + W_{lp}$
Y_{min}	$-L_{lp} - L_{la}$	Y_{max}	$-L_{lp} - L_{la} + L_{l2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.17: Tramo línea vertical 5

7. Tramo línea de transmisión 7: Tramo principal 2

X_{min}	$\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2} + L_{la2}$
Y_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	Y_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.18: Tramo línea principal 2

8. Tramo línea de transmisión 8: Tramo adicional 2

X_{min}	$\frac{W_{lp}}{2} + L_{la2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2} + L_{la2} + L_{lp2}$
Y_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	Y_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.19: Tramo línea adicional 2

Tras finalizar la creación de todos los tramos de línea por separado, se deben unir en una sola línea.

Tras realizar este último paso referente al diseño, se obtiene la figura inicial de nuestro divisor 1 a 4:

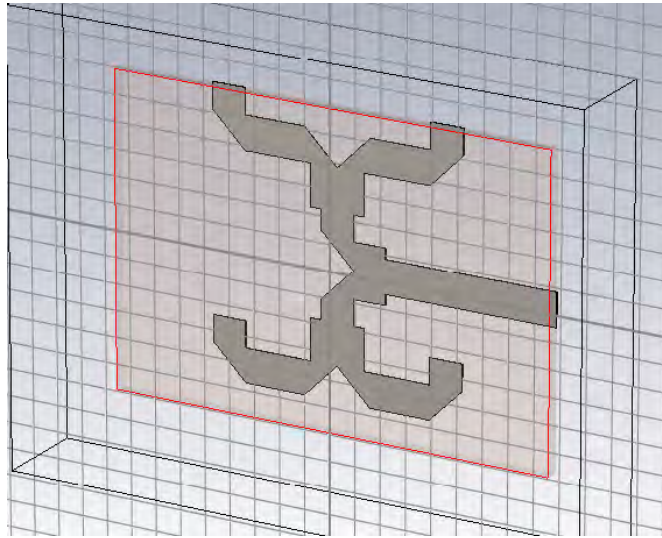


Figura 5.5: Figura divisor 1 a 4

Posteriormente a la obtención de la figura del divisor 1 a 4, se deben configurar los puertos.

En este caso, como se está creando un divisor 1 a 4 se necesitan 5 puertos distintos:

1. **Puerto 1:** Como en la sección anterior ya se había creado el puerto 1, ahora simplemente se debe variar su configuración. En este caso, se debe seleccionar el puerto en X de orientación negativa.
2. **Puertos 2-5:** Estos puertos se deben configurar en Y de orientación negativa.

Tras configurar los puertos, se concluye la creación del divisor 1 a 4 y se procede a realizar la primera simulación.

5.3.2. Optimización de parámetros y resultados

Tras finalizar el diseño de nuestro divisor 1 a 4, se procede a realizar la simulación. En este caso se puede ver como varían los parámetros S de los 5 puertos configurados S_{11} , S_{21} , S_{31} , S_{41} y S_{51} respecto a lo introducido por el puerto 1 en función de la frecuencia.

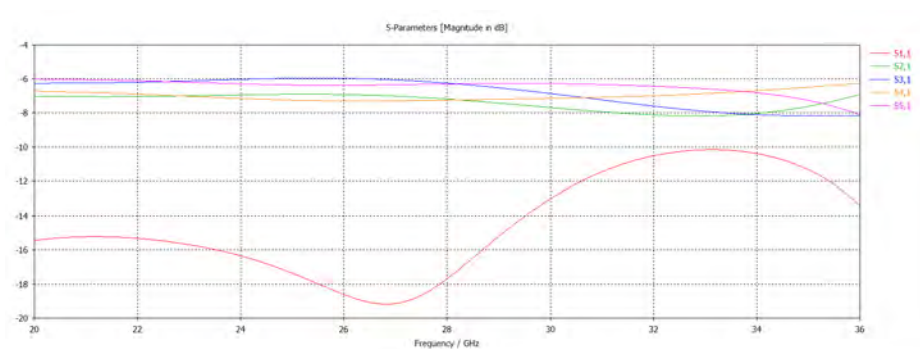


Figura 5.6: Parámetros S del divisor 1 a 4

Al igual que en la sección anterior 5.2 se realizan varias pruebas, variando en este caso el valor del parámetro L_{la2} ; primero se prueba el nuevo diseño utilizando $L_{la} = 0.9\lambda/4$, obteniendo un coeficiente de reflexión de unos -20 dB aproximadamente a 28 GHz y posteriormente se comprueba con el valor $L_{la} = 1.1\lambda/4$, con el que se obtienen -30 dB pero a 33 GHz, una frecuencia muy superior a la deseada.

Como se puede ver, los resultados son bastantes buenos, pero no se consigue el resultado óptimo, por lo que se optimiza el parámetro L_{la2} entre los límites $0.8\lambda/4$ y $1.1\lambda/4$ (ya que para valores mayores los resultados son peores), obteniendo que la mejor solución se obtiene cuando $L_{la2} = 0.86\lambda/4 = 1.26\text{mm}$.

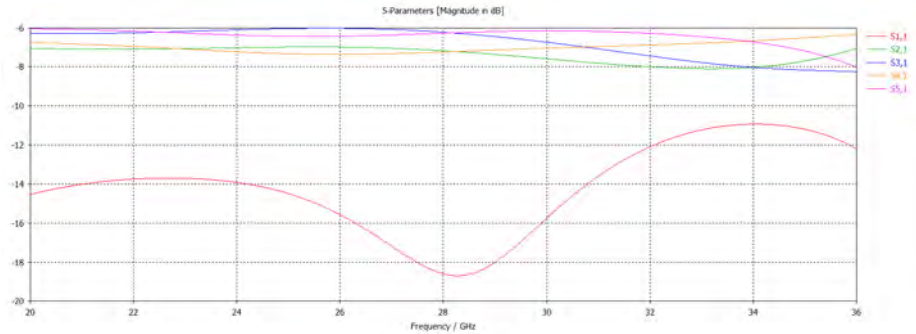


Figura 5.7: Parámetros S del divisor 1 a 4

La solución que presenta el parámetro S_{11} ha mejorado, ya que anteriormente tenía el mínimo a los 27 GHz y ahora presenta su mínimo a una frecuencia algo mayor de 28 GHz, obteniendo en este caso $\Gamma = -18.7\text{ dB}$. Por otro lado, el resto de parámetros S no han variado con respecto al caso anterior, siendo casi constantes en torno a los -6 o -7 dB, con pequeñas variaciones entre ellos.

Por lo tanto, se puede concluir que el diseño realizado es óptimo para continuar a la siguiente etapa y diseñar un divisor 1 a 8.

5.4. Divisor de 1 a 8

Tras finalizar el diseño del divisor 1 a 4 y comprobar que los resultados obtenidos concuerdan con los esperados, se puede comenzar el diseño del divisor 1 a 8.

5.4.1. Diseño

El divisor 1 a 8 se crea a partir del divisor 1 a 4 diseñado en la sección anterior 5.3. Para ello, inicialmente se crean y definen los nuevos parámetros que utilizaremos en este nuevo divisor aparte de los ya existentes. Los nuevos parámetros son los siguientes:

Dimensión horizontal divisor	A_t	$4(\frac{W_{lp}}{2} + L_{la2} + L_{lp2})$	34.2857 mm
Dimensión vertical divisor	B_t	$2(\frac{W_{lp}}{2} + L_{la3} + L_{lp3})$	17.1428 mm
Longitud línea transmisión adicional 3 (tramo $\lambda/4$)	L_{la3}	$\lambda/4$	1.4569 mm
Longitud línea transmisión principal 3	L_{lp3}	$d - L_{la3} - \frac{W_{lp}}{2}$	6.5380 mm

Tabla 5.20: Parámetros iniciales divisor 1 a 8

Las dimensiones del divisor se vuelven a definir, ya que su tamaño se verá aumentado en las coordenadas X al doble de su valor anterior. Realizando este cambio se consigue que todas las líneas de transmisión se encuentren dentro de los límites marcados por las dimensiones del metal.

Para los nuevos tramos de línea, al igual que en la sección anterior 5.3 no es necesario crear las variables que definan su anchura, ya que tendrán la misma anchura que las líneas anteriores.

Se crea la variable L_{lp3} de forma que al ampliar el diseño al siguiente divisor 1 a 16 las salidas de los tramos de línea de ese divisor estén equidistantes con las actuales.

Tras crear los nuevos parámetros y antes de incluir en el nuevo diseño los nuevos tramos de línea necesarios, se deben modificar los tramos ya existentes para centrar el diseño. Para ello, tras seleccionar la línea

existente en el árbol de navegación, se selecciona la opción “Translate” del menú “Transform” dentro del menú superior “Modulation”, apareciendo una nueva ventana en nuestra pantalla. Dicha ventana se debe completar seleccionando la opción “Translate” seleccionada por defecto en este caso, con factor de repetición igual a 1 y escogiendo en este caso un vector de traslación $X = -d = -8.57mm$, las opciones Y y Z deben permanecer en blanco (valor nulo), ya que en nuestro caso, solamente pretendemos desplazar la línea existente una distancia d hacia la izquierda para centrar el diseño posterior.

Antes de crear los nuevos tramos de línea se realiza un *chamfer* en la esquina superior derecha del tramo de línea principal, manteniendo así la anchura para el nuevo diseño que se realizará a posteriori. Este *chamfer* debe tener la misma anchura y el mismo ángulo que los realizados en la subsecciones anteriores 5.2.1 y 5.3.1, es decir, $W_{lp} = 1.29mm$ y 45° , y el diseño se realizará siguiendo la misma secuencia de pasos que anteriormente.

Posteriormente, se copia el diseño actual para conseguir obtener a parte de la línea existente, el mismo diseño en posición simétrica. Para ello, se selecciona la línea en el árbol de navegación y se utiliza la opción “Rotate” del menú “Transform”, apareciendo una nueva ventana en nuestra pantalla. Este mecanismo es muy parecido al mecanismo “Translate”, solo que anteriormente se desplazo el diseño y en esta ocasión se realiza una rotación del mismo. La nueva ventana se debe completar seleccionando la opción “Rotate”, con factor de repetición igual a 1 y seleccionando la opción “copy”, ya que en este caso no solo queremos rotar el diseño actual, sino que se desea obtener el mismo diseño rotado aparte del diseño existente. Por último, se debe escoger un ángulo de rotación de 180° de la variable Y, permaneciendo X y Z en blanco.

Tras realizar la rotación se obtiene una nueva figura, llamada en este caso por el programa Línea_1, que presenta una posición en Z diferente a la figura de la Línea original. Para solucionar este problema, se selecciona la Línea_1 del árbol de navegación, y posteriormente el apartado “Transform Rotate” del “Historial Tree” (presenta toda la información del diseño de la figura) de dicha línea, con el fin de editar su posición. En este caso, como varía la posición en Z, solamente se debe variar la opción Z_0 del origen de la figura, configurando su nuevo valor como $Z_0 = -h - \frac{Esp}{2}$, consiguiendo así que las ambas figuras (Línea y Línea_1) se encuentren en la misma posición en Z.

Después de definir las nuevas variables y realizar las variaciones necesarias en el diseño anterior, al igual que se hizo en la subsección 5.3.1, se procede a la creación de los nuevos tramos de línea de transmisión que forman el divisor 1 a 8:

1. Tramo línea de transmisión 1: Tramo principal 3

X_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2} - L_{la3} - L_{lp3}$	Y_{max}	$-\frac{W_{lp}}{2} - L_{la3}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.21: Tramo línea principal 3

2. Tramo línea de transmisión 2: Tramo adicional 3

X_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2} - L_{la3}$	Y_{max}	$-\frac{W_{lp}}{2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.22: Tramo línea adicional 3

Después de crear todos los tramos de línea por separado (nuevos y Línea y Línea_1), se deben unir en una sola línea de transmisión.

Tras realizar este último paso referente al diseño, se obtiene la figura inicial de nuestro divisor 1 a 8:

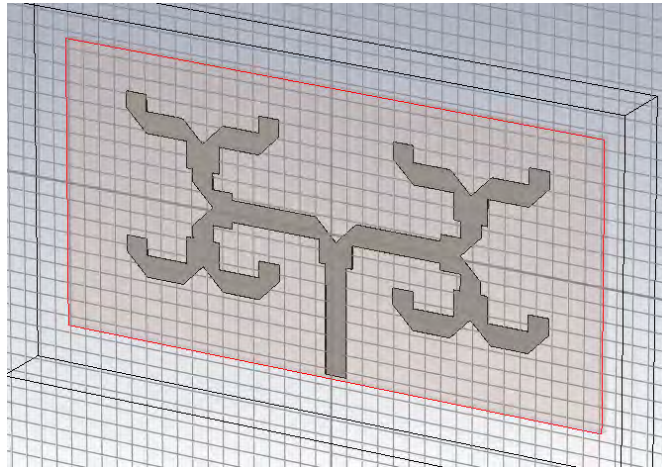


Figura 5.8: Figura divisor 1 a 8

Posteriormente se deben configurar los puertos necesarios para el diseño actual. En este caso, como se esta creando un divisor 1 a 8 se necesitan 9 puertos distintos:

1. **Puerto 1:** Como en la sección anterior 5.3 ya se había creado el puerto 1, ahora simplemente se debe variar su configuración en Y de orientación positiva.
2. **Puertos 2-9:** Estos puertos se configuran en Y de orientación negativa.

Tras configurar los puertos, se concluye la creación del divisor 1 a 8 y se procede realizar la simulación.

5.4.2. Optimización de parámetros y resultados

Tras finalizar el diseño de nuestro divisor 1 a 8, se procede a realizar la simulación.

Como se ha visto en las secciones anteriores 5.2 y 5.3 el diseño final óptimo se obtiene para un valor de L_{la} y L_{la2} distinto al original, por lo que en esta sección se ha llevado a cabo directamente una optimización sin realizar ninguna simulación inicial.

Para ello, al igual que en las secciones anteriores, se optimiza el parámetro L_{la3} entre los límites $0.8\lambda/4$ y $1.2\lambda/4$ para conseguir un parámetro S_{11} inferior a -30 dB en un rango de frecuencias entre los 27.75 GHz y los 28.25 GHz, obteniendo en este caso que la mejor solución se obtiene cuando $L_{la3} = 0.95\lambda/4 = 1.38mm$.

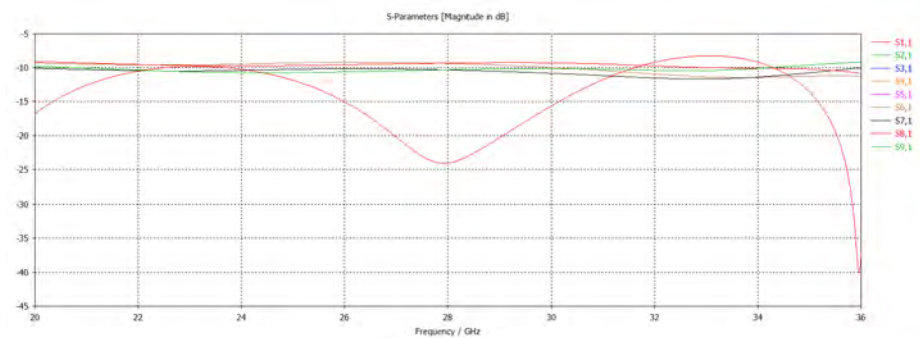


Figura 5.9: Parámetros S del divisor 1 a 8

Al finalizar la simulación, se puede ver como varían los parámetros S de los 9 puertos configurados. Como se puede observar, para el parámetro S_{11} la solución presenta un mínimo de $\Gamma = -24$ dB a la frecuencia de 28 GHz. Por otro lado, el resto de parámetro S (S_{i1} , donde i varia entre 2 a 9), se mantienen casi constantes a -9 dB, con un pequeño descenso en torno a los 33 GHz y pequeñas variaciones entre ellos.

Con esta nueva configuración, se obtiene que la impedancia Z_{ref11} sigue siendo 49.6Ω y el resto de impedancias (Z_{refi1}) permanecen constantes a 49.1Ω .

Por lo tanto, tras observar los resultados obtenidos, se puede concluir que el diseño realizado es óptimo y se puede continuar con el diseño de un divisor 1 a 16.

5.5. Divisor de 1 a 16

Tras realizar el diseño del divisor 1 a 8, se puede comenzar el diseño del divisor 1 a 16. Este divisor nos aporta 16 salidas, lo que nos permite realizar un array de antenas de ranura 4×4 .

5.5.1. Diseño

El divisor 1 a 16 se puede crear a partir del divisor 1 a 8 desplazando (copiando) el mismo a una distancia $2d$ en Y, pero eso implica un problema con los tramos de línea L_{la3} y L_{lp3} . Debido a ello se ha preferido realizar el divisor 1 a 16 a partir del divisor 1 a 4 creado en la sección 5.3. Para ello, se crean y definen los nuevos parámetros que utilizaremos en este nuevo divisor aparte de los ya existentes. Los nuevos parámetros son los siguientes:

Dimensión horizontal divisor	A_t	$2(\frac{W_{lp}}{2} + L_{la4} + L_{lp4})$	34.2857 mm
Dimensión vertical divisor	B_t	$4(\frac{W_{lp}}{2} + L_{la3} + L_{lp3})$	34.2857 mm
Longitud línea transmisión adicional 3 (tramo $\lambda/4$)	L_{la3}	$0.9510\lambda/4$	1.3855 mm
Longitud línea transmisión principal 3	L_{lp3}	$d - L_{la3} - \frac{W_{lp}}{2}$	6.5380 mm
Longitud línea transmisión adicional 4 (tramo $\lambda/4$)	L_{la4}	$\lambda/4$	1.4569 mm
Longitud línea transmisión principal 4	L_{lp4}	$d - L_{la4} + L_{la2} + L_{lp2}$	15.0745 mm

Tabla 5.23: Parámetros iniciales divisor 1 a 16

Las dimensiones del divisor se vuelven a definir (cambiando su valor) ya que su tamaño se verá aumentado tanto en coordenadas X como Y respecto a las dimensiones presentadas en la subsección 5.3.1, consiguiendo así que todas las líneas de transmisión se encuentren dentro de los límites marcados por las dimensiones del metal.

Al igual que en todos los casos anteriores, no es necesario definir la anchura de los nuevos tramos de línea, ya que tendrán la misma anchura que las líneas anteriores.

La variable L_{la3} se crea con el valor obtenido en la sección anterior 5.4, ya que aunque no utilizamos ese diseño su valor es correcto.

Se crea la variable L_{lp4} de forma que al ampliar el diseño al siguiente divisor 1 a 32 las salidas de los tramos de línea de ese divisor estén equidistantes con las actuales.

Tras crear las nuevas variables, se deben modificar las líneas ya existentes para centrar el posterior diseño. Para ello, primero se selecciona la línea existente en el árbol de navegación y se selecciona la opción “Translate”, en este caso, se escoge factor de traslación con variables $X = -d = -8.57mm$ e $Y = d = 8.57mm$, manteniendo la opción Z nula, desplazando así la línea existente hacia arriba y hacia la izquierda. Posteriormente se vuelve a realizar el mismo proceso para copiar el diseño existente a una distancia $2d$ hacia abajo, seleccionando la opción “Translate” sobre esta misma línea, pero en este caso, se debe seleccionar la opción “copy” y escoger factor de traslación $Y = -2d = -17.14mm$. Después de realizar estas dos traslaciones el diseño consta de 2 figuras idénticas a la izquierda del metal y desplazadas una distancia $2d$ entre el centro de ambas.

Antes de crear los nuevos tramos de línea, se realizan 2 *chamfers*, uno en cada figura. En la figura superior el *chamfer* se realiza en la esquina superior derecha del tramo de línea, mientras que en la figura inferior se

realiza en la esquina inferior derecha. Ambos *chamfers* deben tener la misma anchura y el mismo ángulo que los realizados en todas las secciones anteriores, es decir, $W_{lp} = 1.29mm$ y 45° .

Posteriormente, se copia el diseño actual para obtener el mismo diseño en posición simétrica. Para ello, se seleccionan las líneas de ambos diseños en el árbol de navegación y se utiliza la opción “Rotate” con un ángulo de rotación de 180° de la variable Y.

Tras realizar la rotación, al igual que paso en la sección 5.4, las nuevas figuras presentan una posición en Z diferente a la figura de la Línea original. Para solucionar este problema, se seleccionan por separado las nuevas líneas creadas a partir de la rotación en el árbol de navegación, y posteriormente el apartado “Transform Rotate”, variando su posición en Z, configurando su nuevo valor como $Z_0 = -h - \frac{Esp}{2}$ en ambos casos. Con estos cambios de configuración se consigue que las 4 figuras actuales se encuentren en la misma posición en Z.

Después de definir las nuevas variables y realizar todas las variaciones necesarias en el diseño, se crean los nuevos tramos de línea de transmisión que forman el divisor 1 a 16:

1. Tramo línea de transmisión 1: Tramo principal 3.1

X_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Y_{min}	0	Y_{max}	L_{lp3}
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.24: Tramo línea principal 3.1

Tras crear esta línea se debe hacer un *chamfer* con una anchura $W_{lp} = 1.2956mm$ y un ángulo de 45° , para mantener la anchura en la esquina inferior izquierda.

2. Tramo línea de transmisión 2: Tramo adicional 3.1

X_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Y_{min}	L_{lp3}	Y_{max}	$L_{lp3} + L_{la3}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.25: Tramo línea adicional 3.1

3. Tramo línea de transmisión 3: Tramo principal 3.2

X_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Y_{min}	$-L_{lp3}$	Y_{max}	0
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.26: Tramo línea principal 3.2

En este tramo de línea también se debe realizar un *chamfer*, pero en este caso en la esquina superior izquierda de este tramo de línea.

4. Tramo línea de transmisión 4: Tramo adicional 3.2

X_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Y_{min}	$-L_{lp3} - L_{la3}$	Y_{max}	$-L_{lp3}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.27: Tramo línea adicional 3.2

5. Tramo línea de transmisión 5: Tramo principal 4

X_{min}	$\frac{W_{lp}}{2} + L_{la4}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2} + L_{la4} + L_{lp4}$
Y_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	Y_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	$-h$

Tabla 5.28: Tramo línea principal 4

6. Tramo línea de transmisión 6: Tramo adicional 4

X_{min}	$\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2} + L_{la4}$
Y_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	Y_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	$-h$

Tabla 5.29: Tramo línea adicional 4

Después de crear todos los tramos de línea necesarios, se deben unir en una sola línea. Tras realizar este último paso referente al diseño, se obtiene la figura de nuestro divisor 1 a 16:

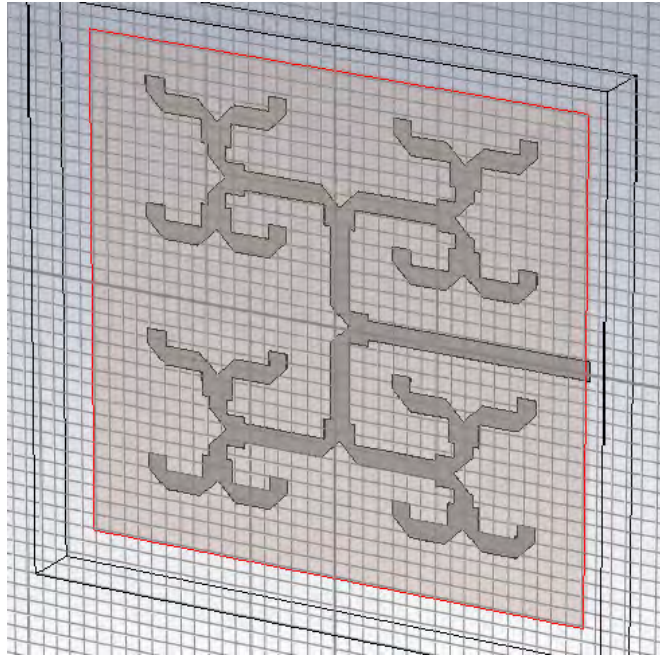


Figura 5.10: Figura divisor 1 a 16

Posteriormente se deben configurar los puertos necesarios para el diseño actual. En este caso, como se está creando un divisor 1 a 16 se necesitan 17 puertos distintos:

1. **Puerto 1:** Como en la sección anterior 5.3 de la que partimos este diseño ya se había creado el puerto 1 y además su configuración coincide con la deseada para el nuevo diseño, no es necesario realizar ningún cambio en su configuración.
2. **Puertos 2-17:** Estos puertos se crean en Y de orientación negativa.

Tras configurar todos los puertos necesarios, se puede realizar la simulación del divisor 1 a 16.

5.5.2. Optimización de parámetros y resultados

Tras finalizar el diseño de nuestro divisor 1 a 16, se procede a realizar la simulación. Al igual que en la sección anterior 5.4, se va a llevar a cabo una optimización sin realizar ninguna simulación inicial, ya que como se ha podido comprobar con anterioridad el diseño óptimo se obtiene para un valor de línea adicional de tramo $\lambda/4$ distinto al original (ligeramente superior o inferior).

Para ello, al igual que en las secciones anteriores, se optimiza el parámetro L_{la4} entre los límites $0.8\lambda/4$ y $1.2\lambda/4$ para conseguir un parámetro S_{11} inferior a -30 dB en un rango de frecuencias entre los 27.75 GHz y los 28.25 GHz. En este caso, se obtiene que la mejor solución se produce cuando $L_{la4} = 0.97\lambda/4 = 1.42mm$.

Variación los parámetros S de los 17 puertos configurados:

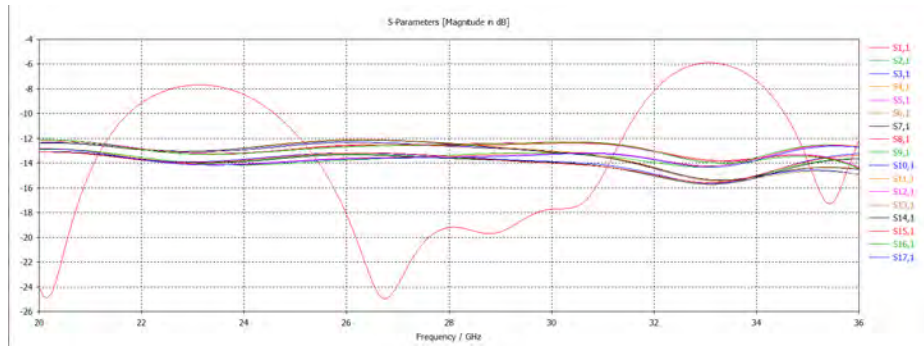


Figura 5.11: Parámetros S del divisor 1 a 16

Como se puede ver, para el parámetro S_{11} , a una frecuencia de 28 GHz se obtienen -19.2 dB, pero el mínimo de $\Gamma = -25$ dB se presenta a la frecuencia de 26.75 GHz. Por otro lado, el resto de parámetro S (S_{i1} , donde i varía entre 2 a 17), se mantienen casi constantes con pequeñas variaciones entre ellos, manteniéndose todos ellos entre los -12 dB y -14 dB, con un pequeño descenso en torno a los 33 GHz.

En este caso, el valor de las impedancias no se ve modificado con respecto al caso anterior, es decir, la impedancia Z_{ref11} sigue siendo de 49.6Ω y el resto de impedancias (Z_{refi1}) permanecen constantes a 49.1Ω .

Por lo tanto, se puede concluir que con los resultados obtenidos y manteniendo el diseño actual se puede continuar con el diseño del siguiente divisor, en este caso, un divisor de 1 a 32 puertos. También cabe recordar, que tras diseñar este divisor 1 a 16 ya sería posible realizar el diseño de un array de antenas de ranura 4×4 .

5.6. Divisor de 1 a 32

Tras finalizar el diseño del divisor 1 a 16, se puede comenzar el diseño del divisor 1 a 32.

5.6.1. Diseño

El divisor 1 a 32 se crea a partir del diseño del divisor 1 a 16 creado en la sección anterior 5.5, ya que básicamente se debe añadir el mismo diseño rotado 180° . Para ello, inicialmente se crean y definen los nuevos parámetros que se utilizarán en este nuevo divisor aparte de las variables ya existentes. Estos nuevos parámetros son:

Dimensión horizontal divisor	A_t	$4(\frac{W_{lp}}{2} + L_{la4} + L_{lp4})$	68.5714 mm
Dimensión vertical divisor	B_t	$4(\frac{W_{lp}}{2} + L_{la3} + L_{lp3})$	34.2857 mm
Longitud línea transmisión adicional 5 (tramo $\lambda/4$)	L_{la5}	$\lambda/4$	1.4569 mm
Longitud línea transmisión principal 5	L_{lp5}	$2d - L_{la5} - \frac{W_{lp}}{2}$	15.1838 mm

Tabla 5.30: Parámetros iniciales divisor 1 a 32

Se vuelven a definir las dimensiones del divisor para evitar que las líneas de transmisión no se encuentren dentro de los límites marcados por las dimensiones del metal.

Para los nuevos tramos de línea no es necesario crear las variables que definan su anchura, ya que tendrán la misma anchura que las líneas anteriores.

La variable L_{lp5} se crea de tal forma que al ampliar el diseño al siguiente divisor 1 a 64 las salidas de los tramos de línea estén equidistantes con las actuales.

Tras crear estos parámetros que después se utilizarán, se debe desplazar la línea existente una distancia $2d$ hacia la izquierda, para ello, al igual que en los apartados anteriores, se hace uso de la opción “Translate”, escogiendo en este caso un factor de traslación de $X = -2d = -17.14mm$. Posteriormente también se debe realizar un *chamfer* en la esquina superior derecha de dicha línea.

Posteriormente, se copia el diseño actual para obtener el mismo en posición simétrica. Para ello, se selecciona la opción “Rotate” con factor de repetición igual a 1 y ángulo de rotación de 180° de la variable Y.

Tras realizar la rotación, al igual que paso en las secciones 5.4 y 5.5, las nuevas figuras presentan una posición en Z diferente a la figura de la Línea original. Para solucionarlo, se selecciona la nueva línea y se varia su posición en Z, configurando su nuevo valor como $Z_0 = -h - \frac{Esp}{2}$. Con este cambio de configuración se consigue que las 2 figuras actuales se encuentren en la misma posición en Z.

Después de realizar todas las variaciones necesarias en el diseño, se crean los nuevos tramos de línea de transmisión que forman el divisor 1 a 32:

1. Tramo línea de transmisión 1: Tramo principal 5

X_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2} - L_{la5} - L_{lp5}$	Y_{max}	$-\frac{W_{lp}}{2} - L_{la5}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.31: Tramo línea principal 5

2. Tramo línea de transmisión 2: Tramo adicional 5

X_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2} - L_{la5}$	Y_{max}	$-\frac{W_{lp}}{2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.32: Tramo línea adicional 5

Después de crear los tramos de línea, se deben unir todos los tramos existentes para obtener una única línea de transmisión.

Tras realizar este último paso referente al diseño, se obtiene la figura inicial de nuestro divisor 1 a 32:

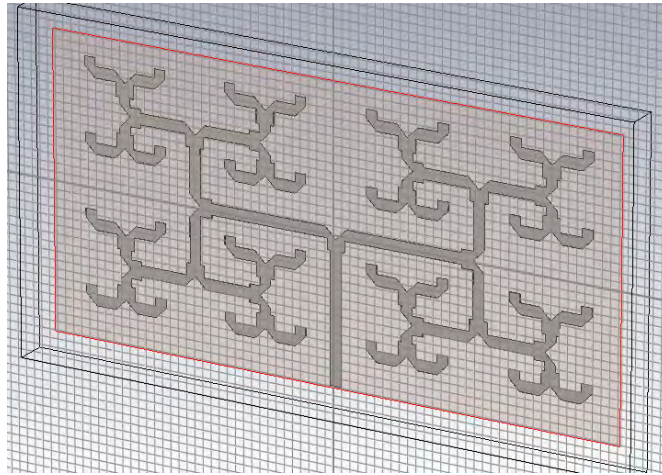


Figura 5.12: Figura divisor 1 a 32

Posteriormente se deben configurar los puertos necesarios para el diseño actual. En este caso, como se esta creando un divisor 1 a 32 se necesitan 33 puertos distintos:

1. **Puerto 1:** Como en la sección anterior 5.5 ya se había creado el puerto 1, ahora simplemente se debe variar su configuración. En este caso, se debe seleccionar el puerto en Y de orientación positiva.
2. **Puertos 2-33:** Estos puertos se configuran en Y de orientación negativa.

Tras configurar todos los puertos necesarios, se puede realizar la simulación del divisor 1 a 32.

5.6.2. Optimización de parámetros y resultados

Tras finalizar el diseño de nuestro divisor 1 a 32, se procede a realizar la simulación.

Al igual que en la sección anterior 5.5, se va a llevar a cabo una optimización sin realizar ninguna simulación inicial, ya que como se ha podido comprobar con anterioridad el diseño óptimo se obtiene para un valor de línea adicional de tramo $\lambda/4$ distinto al original.

Para ello, al igual que en las secciones anteriores, se optimiza el parámetro L_{la5} entre los límites $0.8\lambda/4$ y $1.2\lambda/4$ para conseguir un parámetro S_{11} inferior a -30 dB en un rango de frecuencias entre los 27.75 GHz y los 28.25 GHz. En este caso, se obtiene que la mejor solución se produce cuando $L_{la5} = 0.90\lambda/4 = 1.31mm$.

Al finalizar la simulación, se observa como varían los parámetros S de los 33 puertos configurados.

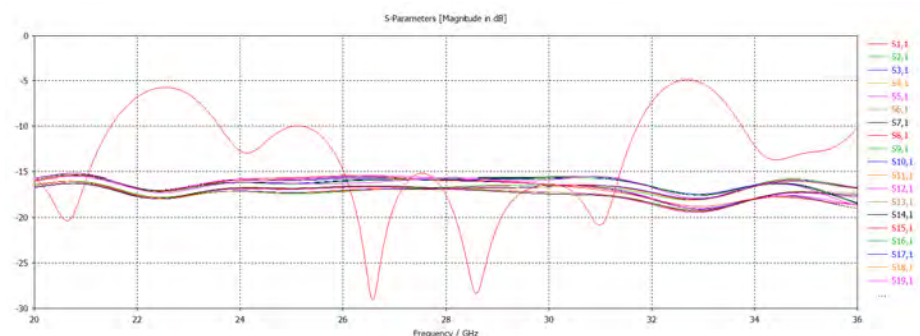


Figura 5.13: Parámetros S del divisor 1 a 32

Como se puede ver, para el parámetro S_{11} , a una frecuencia de 28 GHz se obtienen -17.5 dB, pero el mínimo de $\Gamma = -29$ dB aproximadamente se presenta a las frecuencias de 26.6 GHz y 28.6 GHz. Por otro

lado, el resto de parámetro S (S_{i1} , donde i varia entre 2 a 33), se mantienen casi constantes con pequeñas variaciones entre ellos, manteniéndose todos ellos entre los -16 dB y -18 dB.

Al igual que en el caso anterior, el valor de las impedancias no se ve modificado, siendo la impedancia Z_{ref11} de 49.6Ω y el resto de impedancias (Z_{refi1}) constantes a 49.1Ω .

Se puede concluir que los resultados obtenidos son bastante buenos, ya que los parámetros S son similares a los esperados, por lo que se puede continuar con el diseño del siguiente divisor 1 a 64 que permitiría diseñar un array de antenas de ranura de 8×8 .

5.7. Divisor de 1 a 64

Para finalizar el diseño de nuestra línea de transmisión se crea un divisor 1 a 64. Este divisor nos aportará 64 salidas, por lo que nos permite realizar un array de antenas de ranura 8×8 .

5.7.1. Diseño

El divisor 1 a 64 que se va a crear a continuación se diseñará a partir del divisor 1 a 16 creado anteriormente, ya que al igual que pasaba en la sección 5.5, aunque este divisor se puede crear a partir del divisor 1 a 32 anterior, es preferible realizarlo a partir del divisor 1 a 16 porque facilita el diseño del mismo.

Para iniciar este diseño se crean los nuevos parámetros que se utilizaran:

Dimensión horizontal divisor	A_t	$4(\frac{W_{lp}}{2} + L_{la4} + L_{lp4})$	68.5714 mm
Dimensión vertical divisor	B_t	$4(\frac{W_{lp}}{2} + L_{la5} + L_{lp5})$	68.5714 mm
Longitud línea transmisión adicional 5 (tramo $\lambda/4$)	L_{la5}	$0.90\lambda/4$	1.3112 mm
Longitud línea transmisión principal 5	L_{lp5}	$2d - L_{la5} - \frac{W_{lp}}{2}$	15.1838 mm
Longitud línea transmisión adicional 6 (tramo $\lambda/4$)	L_{la6}	$\lambda/4$	1.4569 mm
Longitud línea transmisión principal 6	L_{lp6}	$\frac{A_t}{2} - L_{la6} - \frac{W_{lp}}{2}$	32.1809 mm

Tabla 5.33: Parámetros iniciales divisor 1 a 64

Al igual que en todos los casos anteriores, se vuelven a definir las dimensiones del divisor, e igualmente no es necesario definir la anchura de los nuevos tramos de línea.

La variable L_{la5} se crea con el valor obtenido en la sección anterior 5.6, ya que aunque no utilizamos ese diseño su valor es correcto.

Se crea la variable L_{lp6} de forma que su limite se encuentre en el borde del metal, ya que no se va a realizar ningún divisor mayor. Si en un futuro se decidiera realizar un array de mayor tamaño, la variable L_{lp6} se debería cambiar y configurar de tal forma que permitiera que las salidas del siguiente divisor estuvieran equidistantes.

Tras crear estas variables, se modifican las líneas ya existentes para centrar el posterior diseño. Para ello, primero se selecciona la línea existente y se traslada, en este caso, se escoge factor de traslación con variables $X = -2d = -17.14mm$ e $Y = 2d = 17.14mm$, manteniendo la opción Z nula, desplazando así la línea existente hacia arriba y hacia la izquierda. Posteriormente se vuelve a realizar el mismo proceso para copiar el diseño existente a una distancia $4d$ hacia abajo, seleccionando la opción “Translate” sobre esta misma línea, pero en este caso, se debe seleccionar la opción “copy” y escoger factor de traslación $Y = -4d = -34.28mm$. Después de realizar estas dos traslaciones el diseño consta de 2 figuras idénticas a la izquierda del metal y desplazadas una distancia $4d$ entre el centro de ambas.

Antes de crear los nuevos tramos de línea, se realizan 2 *chamfers*, uno en cada figura. En la figura superior el *chamfer* se realiza en la esquina superior derecha del tramo de línea, mientras que en la figura inferior se realiza en la esquina inferior derecha.

Posteriormente, se copia el diseño actual para conseguir obtener a partir del diseño existente, el mismo diseño en posición simétrica, utilizando la opción “Rotate” con factor de repetición igual a 1 y escogiendo un ángulo de rotación de 180° de la variable Y. Tras realizar la rotación, las nuevas figuras presentan una posición en Z diferente a la figura de la Línea original. Para solucionarlo, se seleccionan por separado las nuevas líneas creadas a partir de la rotación y se varia su posición en Z, configurando su nuevo valor como $Z_0 = -h - \frac{Esp}{2}$ en ambos casos. Con estos cambios de configuración se consigue que las 4 figuras actuales se encuentren en la misma posición en Z.

Después de definir las nuevas variables y realizar todas las variaciones necesarias en el diseño, se crean los nuevos tramos de línea de transmisión que forman el divisor 1 a 64:

1. Tramo línea de transmisión 1: Tramo principal 5.1

X_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Y_{min}	0	Y_{max}	L_{lp5}
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.34: Tramo línea principal 5.1

Tras crear esta línea se debe hacer un *chamfer* de $W_{lp} = 1.2956mm$ y ángulo de 45° en la esquina inferior izquierda.

2. Tramo línea de transmisión 2: Tramo adicional 5.1

X_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Y_{min}	L_{lp5}	Y_{max}	$L_{lp5} + L_{la5}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.35: Tramo línea adicional 5.1

3. Tramo línea de transmisión 3: Tramo principal 5.2

X_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Y_{min}	$-L_{lp5}$	Y_{max}	0
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.36: Tramo línea principal 5.2

En este tramo de línea también se debe realizar un *chamfer*, pero en este caso, en la esquina superior izquierda de este tramo de línea.

4. Tramo línea de transmisión 4: Tramo adicional 5.2

X_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Y_{min}	$-L_{lp5} - L_{la5}$	Y_{max}	$-L_{lp5}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.37: Tramo línea adicional 5.2

5. Tramo línea de transmisión 5: Tramo principal 6

X_{min}	$\frac{W_{lp}}{2} + L_{la6}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2} + L_{la6} + L_{lp6}$
Y_{min}	$-\frac{W_{lp}}{2}$	Y_{max}	$\frac{W_{lp}}{2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.38: Tramo línea principal 6

6. Tramo línea de transmisión 6: Tramo adicional 6

X_{min}	$\frac{W_{lp}}{2}$	X_{max}	$\frac{W_{lp}}{2} + L_{la6}$
Y_{min}	$-\frac{W_{la}}{2}$	Y_{max}	$\frac{W_{la}}{2}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 5.39: Tramo línea adicional 6

Después de crear todos los tramos de línea necesarios, se deben unir en una sola línea de transmisión. Tras realizar este último paso referente al diseño, se obtiene la figura de nuestro divisor 1 a 64:

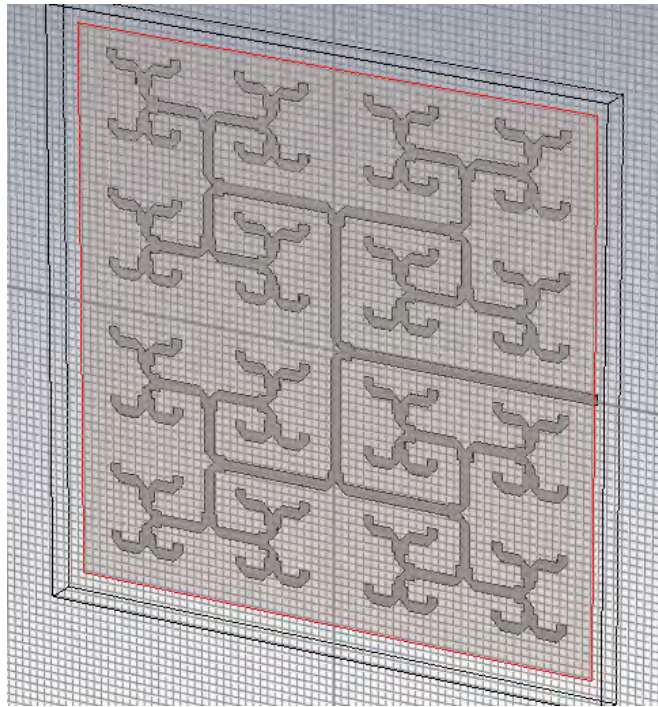


Figura 5.14: Figura divisor 1 a 64

Posteriormente se deben configurar los puertos necesarios para el diseño actual. En este caso, como se esta creando un divisor 1 a 64 se necesitan 65 puertos distintos:

1. **Puerto 1:** Como en la sección anterior 5.5 de la que partimos este diseño ya se había creado el puerto 1 y además su configuración coincide con la deseada para el nuevo diseño, no es necesario realizar ningún cambio en su configuración.
2. **Puertos 2-65:** Igualmente a lo ocurrido en todas la secciones anteriores de este capítulo, todos los puertos a excepción del puerto 1, se deben crear en Y con orientación negativa.

Tras configurar todos los puertos necesarios, se puede realizar la simulación del divisor 1 a 64.

5.7.2. Optimización de parámetros y resultados

Tras finalizar el diseño de nuestro divisor 1 a 64, se procede a realizar la simulación, en este caso se va a realizar directamente una optimización, ya que el diseño óptimo se obtiene para un valor de línea adicional de tramo $\lambda/4$ distinto al original.

En este caso, se optimiza el parámetro L_{la6} entre los límites $0.8\lambda/4$ y $1.2\lambda/4$ para conseguir un parámetro S_{11} inferior a -30 dB en un rango de frecuencias entre los 27.75 GHz y los 28.25 GHz. Curiosamente, en esta ultima simulación se obtiene que la mejor solución se produce cuando $L_{la6} = \lambda/4 = 1.45mm$.

Al finalizar la simulación, se puede ver como varían los parámetros S de los 65 puertos configurados.

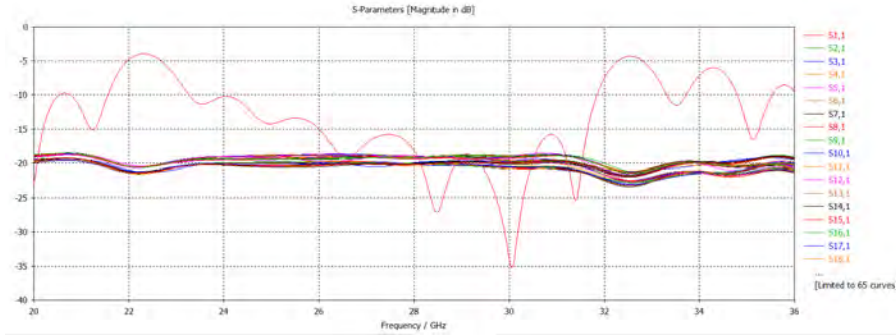


Figura 5.15: Parámetros S del divisor 1 a 64

Como se puede ver, para el parámetro S_{11} , a una frecuencia de 28 GHz se obtienen -18 dB, pero el mínimo de $\Gamma = -35$ dB se presenta a la frecuencia de 30.05 GHz. Por otro lado, el resto de parámetro S (S_{i1}), se mantienen casi constantes con pequeñas variaciones entre ellos en torno a los -19 dB, con pequeños descensos a las frecuencias de 22 GHz y 33 GHz.

Como en todos los casos anteriores, el valor de las impedancias no varía, ya que la impedancia Z_{ref11} sigue siendo de 49.6Ω y el resto de impedancias (Z_{refi1}) permanecen constantes a 49.1Ω .

Se puede concluir que los resultados obtenidos son bastante buenos, ya que el puerto 1 se encuentra adaptado, aunque a una frecuencia algo superior a lo deseado (30 GHz en lugar de 28 GHz) y el resto de puertos permanecen constantes. Por lo tanto, tras diseñar este divisor 1 a 64 ya sería posible realizar el diseño de un array de antenas de ranura 8×8 .

5.8. Conclusiones

En este capítulo se han explicado las diferentes etapas que se deben seguir para diseñar una red de alimentación para un array de antenas de ranura, creando diferentes divisores, como pueden ser los divisores 1 a 16 o 1 a 64, que nos permiten alimentar los futuros array de antenas 4×4 o 8×8 .

Para ello, en cada etapa se añadían los tramos de líneas necesarios, donde su configuración (tamaño) variaba dependiendo de cada caso y se ampliaba el diseño del divisor realizando una figura simétrica del mismo. Todo ello se configura de tal manera que el coeficiente de reflexión S_{11} esté lo más adaptado posible en cada caso y que el resto de parámetros S fuesen lo más constantes posibles (el valor de estos coeficientes desciende aproximadamente unos 3 dB en cada etapa). Igualmente las nuevas líneas de transmisión creadas se configuran de tal forma que se siga consiguiendo obtener una impedancia característica $Z_{ref} = 50\Omega$, por ello se crean con la misma anchura (W_{lp} o W_{la}) que las líneas ya existentes.

Por lo tanto, tras crear los distintos divisores, se puede iniciar el diseño final de nuestro array de antenas de ranura.

Capítulo 6

Diseño de array de antenas

6.1. Características generales

Tras finalizar el diseño de los distintos divisores necesarios para crear la red de alimentación para nuestro array de antenas en el capítulo 5, se continúa el diseño de dicho array introduciendo las antenas de banda ancha en el diseño actual.

Para crear nuestro array de antenas de ranura se deben crear las líneas de transmisión necesarias en cada caso que harán el papel de la antena de banda ancha, utilizando los valores obtenidos en el capítulo 4 e igualmente introducir las ranuras necesarias en cada caso en nuestro metal.

En este capítulo se crearán distintos arrays de antenas para todos los divisores diseñados en el capítulo anterior 5, comenzando por un array 1 x 2 hasta conseguir diseñar un array final de antenas de ranura 8 x 8.

6.2. Array de antenas de ranura de 1 x 2

6.2.1. Diseño

Como ya se ha comentando anteriormente en la sección 6.1 de este mismo capítulo, se realizará un array de antenas para cada etapa del divisor del capítulo anterior, comenzando en este caso por un array de antenas 1 x 2.

Para crear este array 1 x 2 se va a partir del proyecto del divisor 1 a 2 diseñado anteriormente en la sección 5.2 del capítulo 5.

Primero, se deben crear las nuevas variables que se utilizarán para crear las líneas de transmisión que harán el papel de antena de banda ancha, donde estas variables están definidas según los valores obtenidos en el capítulo 4:

Tamaño antena	tam_{antena}	5.7789 mm
Anchura línea transmisión vertical	$W_{l_ant_ver}$	0.1011 mm
Longitud línea transmisión vertical	$L_{l_ant_ver}$	1.2029 mm
Anchura línea transmisión horizontal	$W_{l_ant_hor}$	0.3571 mm
Longitud línea transmisión horizontal	$L_{l_ant_hor}$	1.3042 mm
Posición línea transmisión vertical respecto centro ranura	V_c	0.0270 mm
Anchura ranura	W_r	0.6706 mm
Longitud ranura	L_r	3.5714 mm

Tabla 6.1: Parámetros antena banda ancha array

Se define el tamaño de la antena como una variable auxiliar que permite introducir dentro de su dimensión vertical del metal las antenas creadas en el capítulo 4 sin que estas se solapen, por ello, $tam_{antena} = A_t - L_l - L_{l_ant_ver} - V_c - W_{l_ant_hor} = 5.77mm$, donde A_t es la dimensión vertical del metal y L_l es la longitud de la línea principal obtenida en el capítulo 4. Esta variable tam_{antena} se añade a ambas dimensiones del metal, lo que implica que ahora sus valores sean $A_t = 17.64mm$ y $B_t = 11.71mm$.

Tras crear estas variables, se deben crear las líneas de las antenas:

1. Tramo línea antena vertical derecha

X_{min}	$\frac{d}{2} - \frac{W_{l_ant_ver}}{2}$	X_{max}	$\frac{d}{2} + \frac{W_{l_ant_ver}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2}$	Y_{max}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2} + L_{l_ant_ver} + V_c$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 6.2: Tramo línea antena vertical derecha

2. Tramo línea antena horizontal derecha

X_{min}	$\frac{d}{2} - \frac{L_{l_ant_hor}}{2}$	X_{max}	$\frac{d}{2} + \frac{L_{l_ant_hor}}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2} + L_{l_ant_ver} + V_c$	Y_{max}	$Y_{min} + W_{l_ant_hor}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 6.3: Tramo línea antena horizontal derecha

Tras crear las líneas de la antena de banda ancha de la derecha del divisor, se deben unir ambas líneas entre si.

Posteriormente se procede a trasladar (copiar) las nuevas líneas de las antenas en la posición izquierda del divisor 1 a 2, para ello, se selecciona dicha línea (formada por las dos líneas creadas anteriormente) y se escoge la opción “Translate”, seleccionando un factor de repetición igual a 1 y vector de traslación $X = -d = -8.57mm$, desplazando la línea existente una distancia d hacia la izquierda.

Tras realizar esta traslación, se deben unir ambas líneas a la línea del divisor 1 a 2 ya existente.

Del mismo modo que se han creado las líneas que corresponden con las antenas de banda ancha, se deben crear las ranuras necesarias, en este caso, solamente se necesitan dos ranuras:

1. Ranura derecha

X_{min}	$\frac{d}{2} - \frac{L_r}{2}$	X_{max}	$\frac{d}{2} + \frac{L_r}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2} + L_{l_ant_ver}$	Y_{max}	$Y_{min} + W_r$
Z_{min}	0	Z_{max}	0

Tabla 6.4: Ranura derecha

2. Ranura izquierda

X_{min}	$-\frac{d}{2} - \frac{L_r}{2}$	X_{max}	$-\frac{d}{2} + \frac{L_r}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2} + L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2} + L_{l_ant_ver}$	Y_{max}	$Y_{min} + W_r$
Z_{min}	0	Z_{max}	0

Tabla 6.5: Ranura izquierda

La creación de estas ranuras se podría haber realizado de la misma forma que la creación de los dos tramos de línea de las antenas, es decir, creando una sola ranura (por ejemplo la ranura derecha) y posteriormente trasladando esta ranura hacia la izquierda una distancia d .

Tras definir ambas ranuras, se deben combinar con el metal para realmente conseguir que el metal tenga dos aperturas. Para ello, al igual que se hizo en la sección 3.2 del capítulo 3, se debe seleccionar el metal en el árbol de navegación, seguidamente seleccionar la opción “Subtract” y finalmente se escogen las ranuras creadas, consiguiendo así el diseño de nuestro metal con dos ranuras.

Tras realizar este último paso referente al diseño, se obtiene la figura de nuestro array de antenas de ranura 1 x 2:

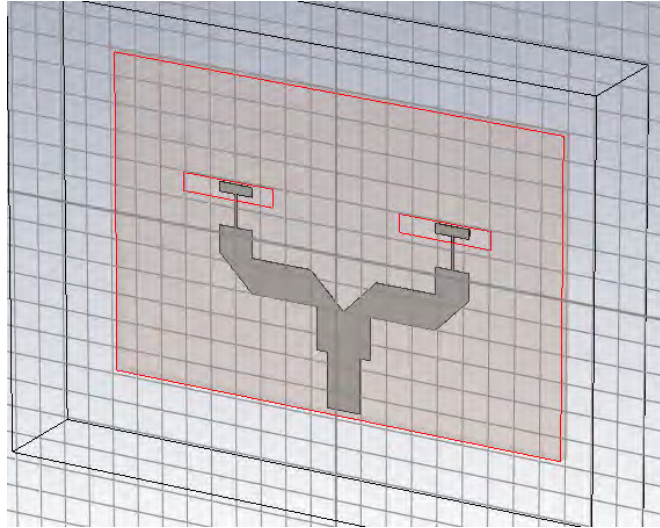


Figura 6.1: Figura array 1 x 2

Tras realizar todas las configuraciones necesarias, ya se puede realizar la simulación y observar los distintos resultados obtenidos.

6.2.2. Resultados diseño

Tras finalizar el diseño de nuestro array 1 x 2, se procede a realizar la simulación.

Al finalizar la simulación, se pueden ver los distintos resultados en el árbol de navegación en la izquierda de la pantalla.

Se puede ver como varía el parámetro S_{11} :

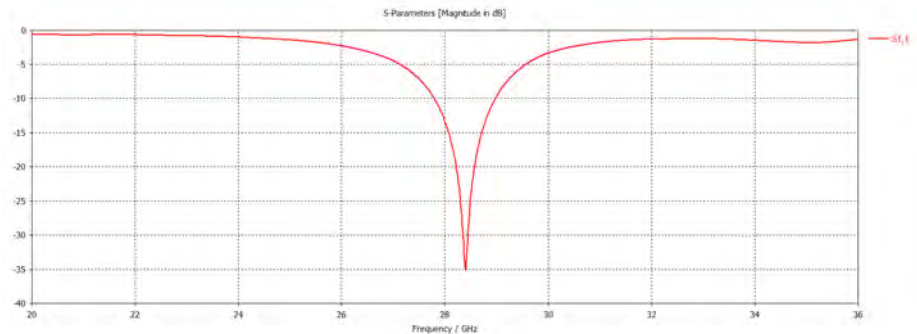


Figura 6.2: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 1 x 2

Como se puede ver, se obtienen -35 dB a una frecuencia de 28.4 GHz, lo que implica que el diseño hasta este punto se ha realizado correctamente. Además se consigue un ancho de banda de 1.2 GHz a -10 dB.

De la misma forma, se observa el diagrama de radiación de nuestro array de antenas de ranura. Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

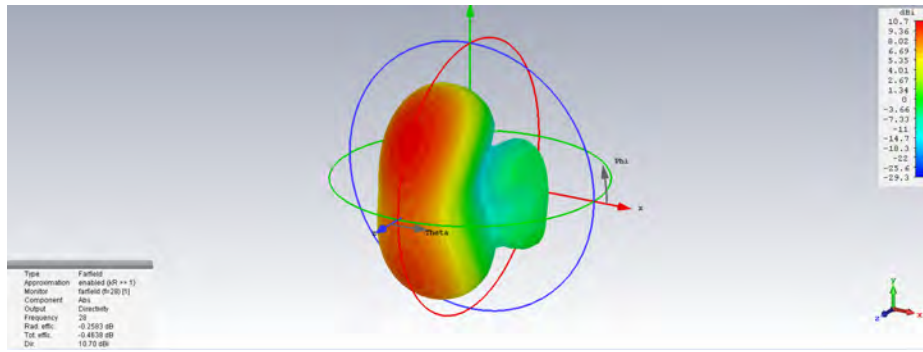


Figura 6.3: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 10.70 dB. Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

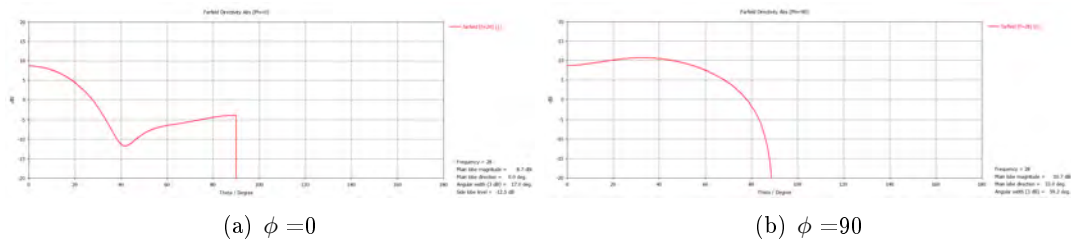


Figura 6.4: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

Como se puede observar, en el plano XZ el lóbulo principal solamente consigue 8.7 dB, mientras que en el plano YZ se consiguen 10.7 dB, sin la aparición de ningún lóbulo lateral en ninguno de los casos.

Por ultimo, también se observan los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares.



Figura 6.5: Diagrama de radiación de la antena en polares

De momento, se siguen manteniendo los mismos resultados, con la aparición de un único lóbulo principal. Por lo tanto, se puede concluir que el diseño del array 1 x 2 realizado es óptimo, por lo que se puede crear el array 2 x 2.

6.3. Array de antenas de ranura de 2 x 2

6.3.1. Diseño

En esta sección se va a diseñar un array de antenas de ranura 2 x 2, partiendo del proyecto del divisor 1 a 4 diseñado anteriormente en la sección 5.3 del capítulo 5.

Primero se deben crear las nuevas variables que se utilizarán para crear las líneas de las antenas de banda ancha y las ranuras. Estas variables se definen igual que en la tabla 6.1 de la subsección 6.2.1 de este mismo capítulo, tomando los valores obtenidos en el capítulo 4.

En este caso, no es necesario modificar el valor de la variable de la dimensión horizontal A_t , ya que solamente aumenta la dimensión vertical $B_t = 23.42mm$.

Tras crear estas variables, se deben crear las líneas de las antenas. Para ello, solamente se crean las líneas de la antena superior derecha y a partir de esta se obtienen el resto.

1. Tramo línea antena vertical superior derecha

X_{min}	$\frac{d}{2} - \frac{W_{l_ant_ver}}{2}$	X_{max}	$\frac{d}{2} + \frac{W_{l_ant_ver}}{2}$
Y_{min}	$L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2}$	Y_{max}	$L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2} + L_{l_ant_ver} + V_c$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 6.6: Tramo línea antena vertical superior derecha

2. Tramo línea antena horizontal superior derecha

X_{min}	$\frac{d}{2} - \frac{L_{l_ant_hor}}{2}$	X_{max}	$\frac{d}{2} + \frac{L_{l_ant_hor}}{2}$
Y_{min}	$L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2} + L_{l_ant_ver} + V_c$	Y_{max}	$L_{lp} + L_{la} + W_{lp} + L_{l2} + L_{l_ant_ver} + V_c + W_{l_ant_hor}$
Z_{min}	$-h - Esp$	Z_{max}	-h

Tabla 6.7: Tramo línea antena horizontal superior derecha

Tras crear las 2 líneas de la antena de banda ancha, se unen ambas líneas en una sola línea. Posteriormente se procede a trasladar las nuevas líneas de las antenas en el resto de posiciones del array 2 x 2, donde el valor de traslación varia según la posición futura de la línea de la antena, como se muestra en la siguiente tabla:

Línea superior izquierda	X	-d	Y	0	Z	0
Línea inferior derecha	X	0	Y	-d	Z	0
Línea inferior izquierda	X	-d	Y	-d	Z	0

Tabla 6.8: Creación de líneas de antenas restantes

Tras realizar estas 3 traslaciones, se deben unir todas las líneas existentes a la línea del divisor 1 a 4, consiguiendo así una única línea de transmisión acabada en las 4 antenas creadas recientemente.

Del mismo modo que se han creado las líneas que corresponden con las antenas de banda ancha, se deben crear las ranuras necesarias. Lo que nos proporciona la siguiente figura:

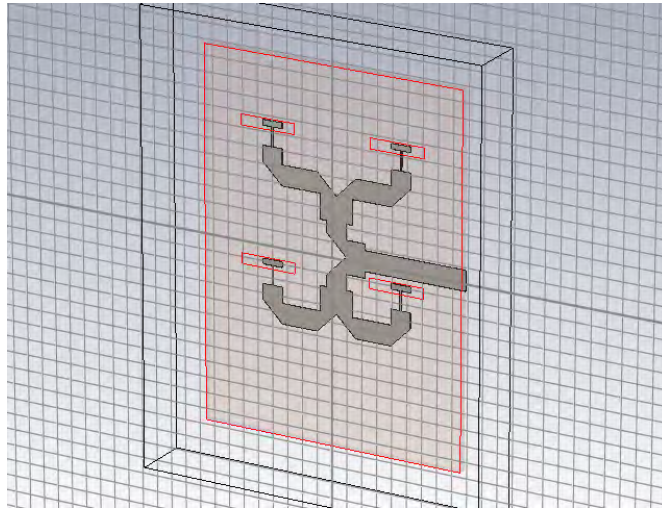


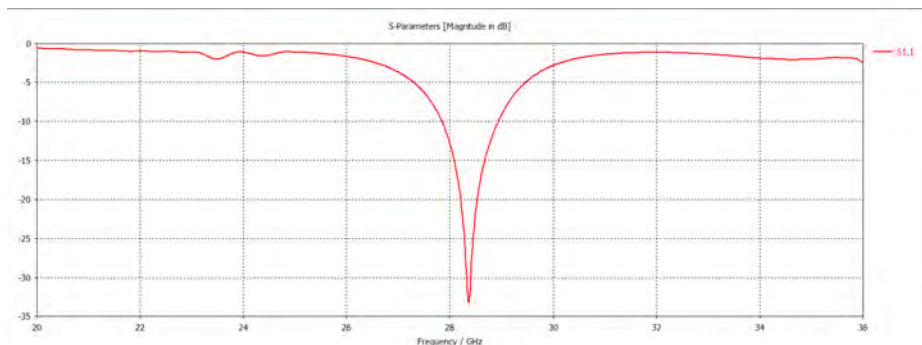
Figura 6.6: Figura array 2 x 2

Tras realizar todas estas configuraciones, se podría realizar la simulación de nuestro array.

6.3.2. Resultados diseño

Tras finalizar el diseño de nuestro array 2 x 2, se realiza la simulación, con lo que se consiguen los siguientes resultados:

El parámetro S_{11} :

Figura 6.7: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 2 x 2

Como se puede ver, se obtienen -33 dB a una frecuencia de 28.35 GHz, lo que implica que el diseño hasta este punto se ha realizado correctamente. Además se consigue un ancho de banda de 1.1 GHz a -10 dB.

Igualmente, el valor de la impedancia característica no ha cambiado con respecto al caso anterior, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.6\Omega$.

Se puede ver cómo varía el diagrama de radiación de nuestro array de antenas de ranura, con el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

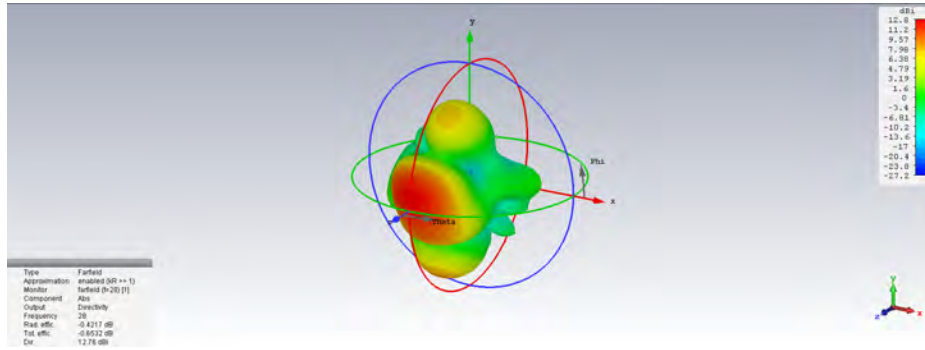


Figura 6.8: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 12.76 dB.

Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

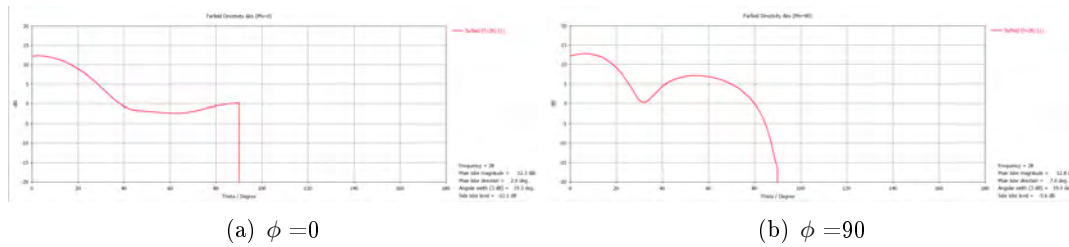


Figura 6.9: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

Como se puede observar, tanto en el plano XZ como en el plano YZ el lóbulo principal proporciona algo más de 12 dB, con la aparición de un lóbulo lateral de 7.2 dB en el plano YZ.

Por ultimo, también se pueden observar los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares:

Figura 6.10: Diagrama de radiación de la antena en polares con $\phi = 0$

Como se puede observar, con esta nueva configuración aparecen 2 lóbulos laterales, en ambos casos a partir de los 40° aproximadamente.

6.4. Array de antenas de ranura de 2 x 4

6.4.1. Diseño

En esta sección se va a diseñar un array de antenas de ranura 2 x 4, partiendo del proyecto del divisor 1 a 8 diseñado anteriormente en la sección 5.4 del capítulo 5.

Primero se deben crear las nuevas variables que se utilizarán para crear las nuevas líneas necesarias y las ranuras. Estas variables se definen igual que en la tabla 6.1 de la subsección 6.2.1 de este mismo capítulo, tomando los valores obtenidos en el capítulo 4.

En este caso, no es necesario modificar el valor de la variable de la dimensión horizontal B_t , solamente aumentar la dimensión vertical A_t , hasta los 34.28 mm.

Tras crear estas variables, se deben crear las líneas de las antenas. Para ello, en este caso solamente se crean las líneas que corresponden a la tercera salida superior comenzando por la izquierda del diseño, ya que esta antena tendría la misma configuración que la diseñada en la sección anterior 6.3.

Tras crear las 2 líneas de la antena de banda ancha, se unen en una sola y esta se traslada al resto de posiciones del array 2 x 4 tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Línea superior 1	X	-2d	Y	0	Z	0
Línea superior 2	X	-d	Y	0	Z	0
Línea superior 4	X	d	Y	0	Z	0
Línea inferior 1	X	-2d	Y	-d	Z	0
Línea inferior 2	X	-d	Y	-d	Z	0
Línea inferior 3	X	0	Y	-d	Z	0
Línea inferior 4	X	d	Y	-d	Z	0

Tabla 6.9: Creación de líneas de antenas restantes

Tras realizar estas traslaciones, se deben unir todas las líneas existentes a la línea del divisor 1 a 8, consiguiendo así una única línea de transmisión acabada en las 8 antenas creadas recientemente.

Del mismo modo que se han creado las líneas que corresponden con las antenas de banda ancha, se deben crear las ranuras necesarias. Lo que nos proporciona la siguiente figura:

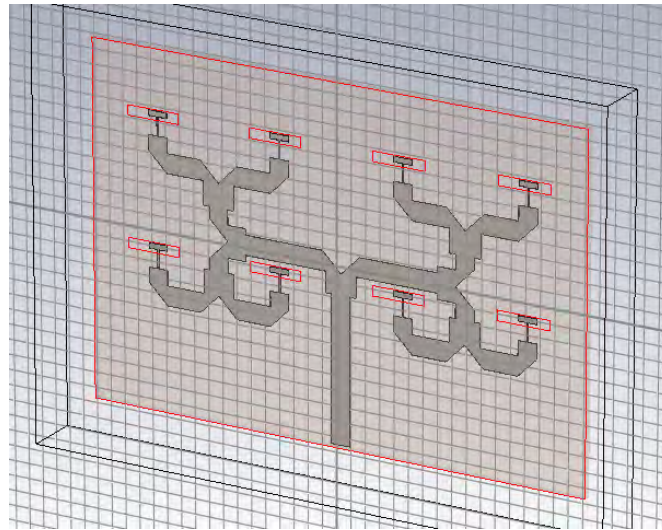


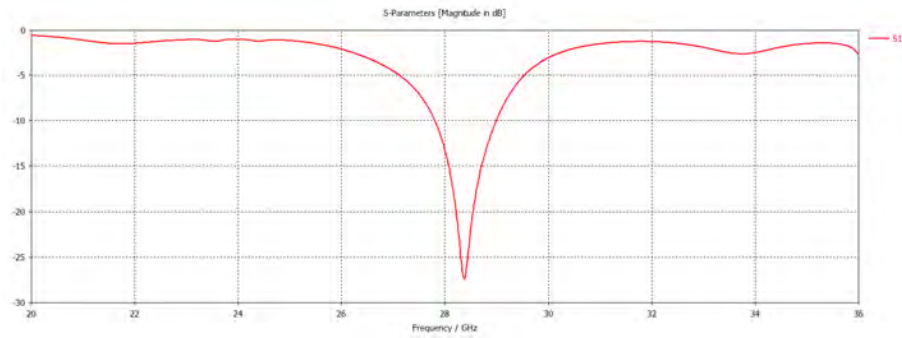
Figura 6.11: Figura array 2 x 4

Tras realizar todas estas configuraciones, se podría realizar la simulación de nuestro array.

6.4.2. Resultados diseño

Tras finalizar el diseño de nuestro array 2 x 4, se realiza la simulación, y se observan los distintos resultados en el árbol de navegación en la izquierda de la pantalla.

Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

Figura 6.12: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 2 x 4

Como se puede ver, se obtienen -27.4 dB a una frecuencia de 28.35 GHz, lo que implica que el diseño hasta este punto se ha realizado correctamente, ya que prácticamente esta adaptado a 28 GHz. Además, con este diseño se consigue un ancho de banda de 1.2 GHz a -10 dB.

Igualmente, el valor de la impedancia característica no ha cambiado con respecto al caso anterior, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.6\Omega$.

Diagrama de radiación de nuestro array de antenas de ranura en 3 dimensiones:

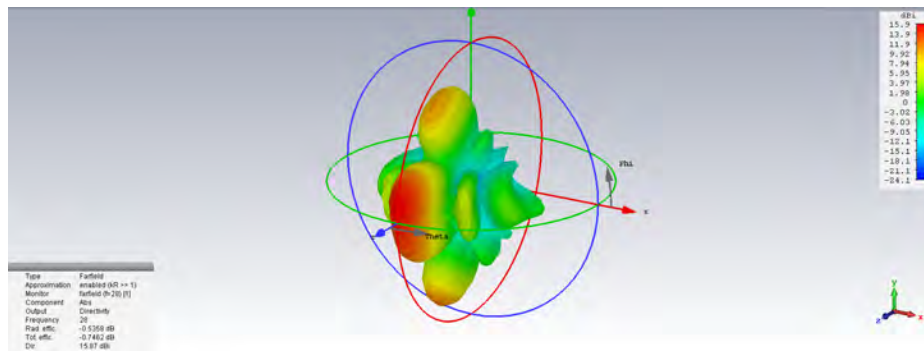


Figura 6.13: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 15.87 dB, y la aparición de 2 grandes lóbulos secundarios.

Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

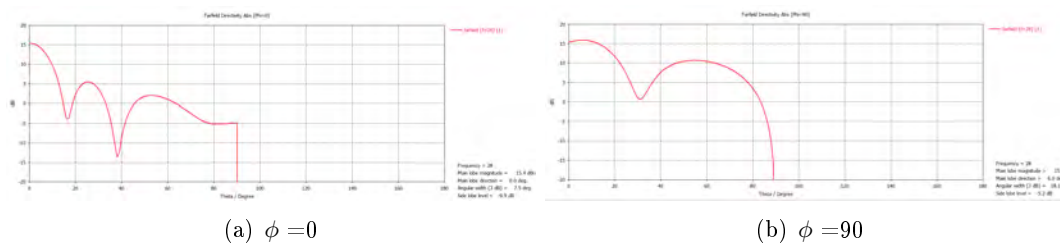


Figura 6.14: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

Como se puede observar, tanto en el plano XZ como en el plano YZ el lóbulo principal proporciona casi 16 dB, pero además en este caso, ya se obtienen lóbulos secundarios de gran tamaño (-10 dB en el plano XZ y -5 dB en el plano YZ).

Para finalizar, se observan los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares:



Figura 6.15: Diagrama de radiación de la antena en polares

Como se puede observar, siguen apareciendo 2 lóbulos laterales, en ambos casos a partir de los 40° aproximadamente, aunque en este caso, más pronunciados que en el array anterior 2×2 .

Por lo tanto, se puede concluir que el diseño del array 2×4 es bueno, debido a la gran adaptación del puerto 1 y a la gran directividad obtenida.

6.5. Array de antenas de ranura de 4×4

6.5.1. Diseño

En esta sección se va a diseñar un array de antenas de ranura 4×4 , partiendo del proyecto del divisor 1 a 16 diseñado anteriormente en la sección 5.5 del capítulo 5.

Primero se deben crear las nuevas variables que se utilizarán para crear las nuevas líneas necesarias y las ranuras. Estas variables se definen igual que en la tabla 6.1 de la subsección 6.2.1 de este mismo capítulo, tomando los valores obtenidos en el capítulo 4.

En este caso, no es necesario modificar el valor de la variable de la dimensión horizontal A_t , solamente aumenta la dimensión vertical B_t , a la que se añaden 2 veces la variable tam_{antena} , quedando $B_t = 45.84mm$.

Tras crear estas variables, se deben crear las líneas de las antenas. Para ello, en este caso solamente se crean las líneas que corresponden a la tercera salida de la segunda fila superior comenzando por la izquierda del diseño, ya que esta antena tendría la misma configuración que la diseñada en la sección 6.3.

Tras crear las 2 líneas de la antena de banda ancha se unen en una sola. Posteriormente se procede a trasladar las nuevas líneas de las antenas en el resto de posiciones del array 4×4 , como se muestra en la siguiente tabla:

Línea 1 fila 1	X	-2d	Y	d	Z	0
Línea 2 fila 1	X	-d	Y	d	Z	0
Línea 3 fila 1	X	0	Y	d	Z	0
Línea 4 fila 1	X	d	Y	d	Z	0
Línea 1 fila 2	X	-2d	Y	0	Z	0
Línea 2 fila 2	X	-d	Y	0	Z	0
Línea 4 fila 2	X	d	Y	0	Z	0
Línea 1 fila 3	X	-2d	Y	-d	Z	0
Línea 2 fila 3	X	-d	Y	-d	Z	0
Línea 3 fila 3	X	0	Y	-d	Z	0
Línea 4 fila 3	X	d	Y	-d	Z	0
Línea 1 fila 4	X	-2d	Y	-2d	Z	0
Línea 2 fila 4	X	-d	Y	-2d	Z	0
Línea 3 fila 4	X	0	Y	-2d	Z	0
Línea 4 fila 4	X	d	Y	-2d	Z	0

Tabla 6.10: Creación de líneas de antenas restantes

Tras realizar estas traslaciones, se deben unir todas las líneas existentes a la línea del divisor 1 a 16.

Del mismo modo que se han creado las líneas que corresponden con las antenas de banda ancha, se deben crear las ranuras necesarias. El resultado se muestra en la siguiente figura:

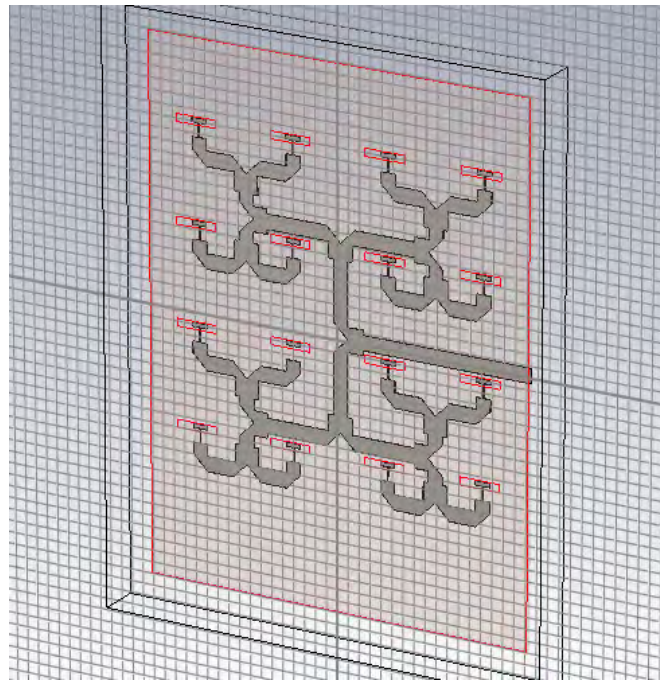


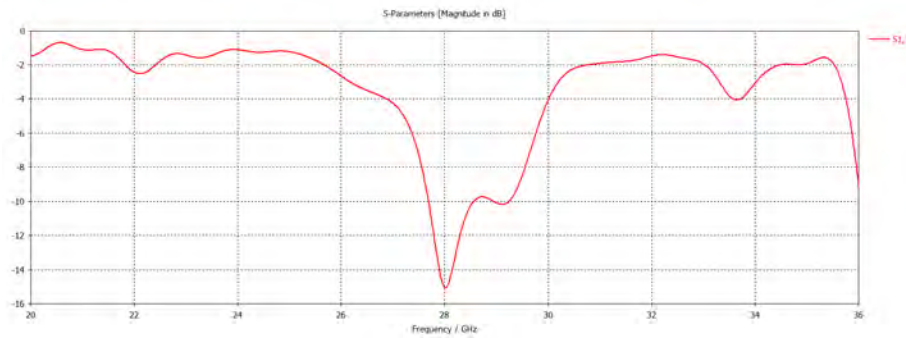
Figura 6.16: Figura array 4 x 4

Tras realizar todas estas configuraciones, se podría realizar la simulación de nuestro array.

6.5.2. Resultados diseño

Tras finalizar el diseño de nuestro array 4 x 4, se realiza la simulación, donde se pueden ver los distintos resultados en el árbol de navegación en la izquierda de la pantalla.

El parámetro S_{11} :

Figura 6.17: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4

Como se puede ver, se obtienen -15 dB a una frecuencia de 28 GHz, lo que implica que el diseño hasta este punto se ha realizado correctamente, ya que justamente esta adaptado a 28 GHz, tal y como se pretendía. Además, con este diseño se consigue un ancho de banda de 0.9 GHz a -10 dB.

Comentar que si se comparan estos resultados con los obtenidos en las secciones anteriores proporcionadas por otro array de menor tamaño, se puede concluir que conforme aumenta el tamaño del array aumenta el valor del parámetro S_{11} , pasando por ejemplo de -33 dB en el array 2 x 2 a los -15 dB en el array 4 x 4.

Al igual que en los casos anteriores, la impedancia característica no ha cambiado, ya que su valor sigue siendo $Z_{ref} = 49.6\Omega$.

Se puede ver como varía el diagrama de radiación de nuestro array de antenas de ranura. Se obtiene el siguiente diagrama de radiación:

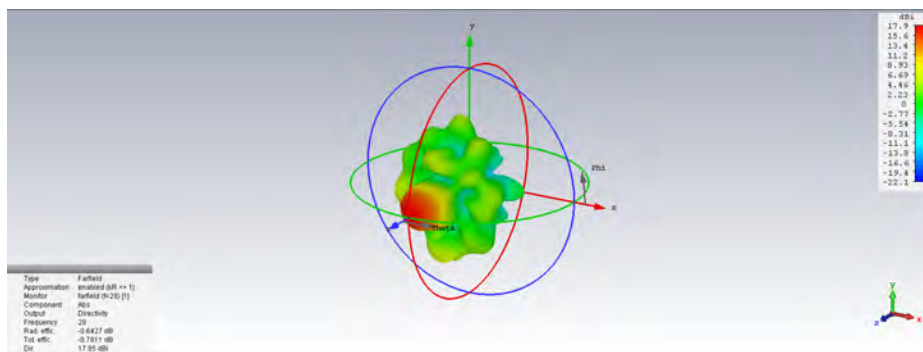


Figura 6.18: Diagrama de radiación de la antenna en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 17.83 dB, y la aparición de varios lóbulos laterales.

Comentar, que conforme aumenta el tamaño del array, también aumenta la directividad que proporciona. Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

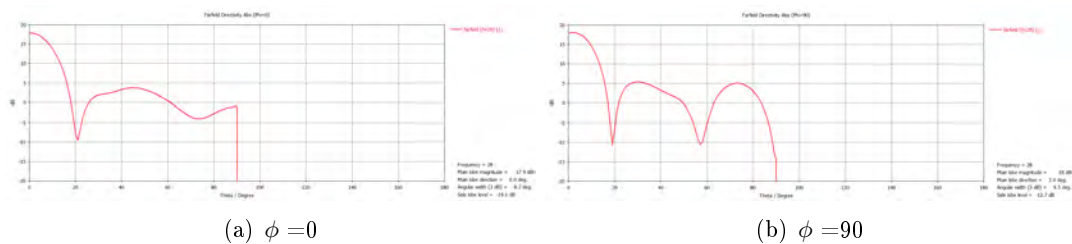


Figura 6.19: Diagrama de radiación de la antenna en cartesianas

Como se puede observar, tanto en el plano XZ como en el plano YZ el lóbulo principal proporciona 18

dB, y además en ambos casos aparece un lóbulo lateral de -14 dB y de -12.7 dB lo que indica que las amplitudes de alimentación de los elementos son prácticamente uniformes tal y como queríamos.

Igualmente, se observan los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares:



Figura 6.20: Diagrama de radiación de la antena en polares

Por lo tanto, se puede concluir que el diseño del array 4 x 4 es óptimo, ya que se consigue una gran adaptación del puerto 1, una mayor directividad y además los lóbulos secundarios están en torno a los -13 dB tal y como se espera de una distribución de amplitud uniforme.

6.6. Array de antenas de ranura de 4 x 8

6.6.1. Diseño

En esta sección se va a diseñar un array de antenas de ranura 4 x 8, partiendo del proyecto del divisor 1 a 32 diseñado anteriormente en la sección 5.6 del capítulo 5.

Primero, al igual que en todas las secciones anteriores de este mismo capítulo, se deben crear las nuevas variables que se utilizarán para crear las nuevas líneas necesarias y las ranuras. Estas variables se definen igual que en la tabla 6.1 de la subsección 6.2.1, tomando los valores obtenidos en el capítulo 4.

En este caso, no es necesario modificar el valor de la variable de la dimensión horizontal B_t , solamente aumenta la dimensión vertical A_t hasta los 68.57 mm.

Tras crear estas variables, se deben crear las líneas de las antenas. Para ello, en este caso solamente se crean las líneas que corresponden a la quinta salida de la segunda fila superior comenzando por la izquierda del diseño, ya que esta antena tendría la misma configuración que la diseñada en la sección 6.3.

Tras crear las 2 líneas de la antena de banda ancha, se unen en una sola, y esta se traslada al resto de posiciones del array 4 x 8, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Línea 1 fila 1	X	-4d	Y	d	Z	0
Línea 2 fila 1	X	-3d	Y	d	Z	0
Línea 3 fila 1	X	-2d	Y	d	Z	0
Línea 4 fila 1	X	-d	Y	d	Z	0
Línea 5 fila 1	X	0	Y	d	Z	0
Línea 6 fila 1	X	d	Y	d	Z	0
Línea 7 fila 1	X	2d	Y	d	Z	0
Línea 8 fila 1	X	3d	Y	d	Z	0
Línea 1 fila 2	X	-4d	Y	0	Z	0
Línea 2 fila 2	X	-3d	Y	0	Z	0
Línea 3 fila 2	X	-2d	Y	0	Z	0
Línea 4 fila 2	X	-d	Y	0	Z	0
Línea 6 fila 2	X	d	Y	0	Z	0
Línea 7 fila 2	X	2d	Y	0	Z	0
Línea 8 fila 2	X	3d	Y	0	Z	0
Línea 1 fila 3	X	-4d	Y	-d	Z	0
Línea 2 fila 3	X	-3d	Y	-d	Z	0
Línea 3 fila 3	X	-2d	Y	-d	Z	0
Línea 4 fila 3	X	-d	Y	-d	Z	0
Línea 5 fila 3	X	0	Y	-d	Z	0
Línea 6 fila 3	X	d	Y	-d	Z	0
Línea 7 fila 3	X	2d	Y	-d	Z	0
Línea 8 fila 3	X	3d	Y	-d	Z	0
Línea 1 fila 4	X	-4d	Y	-2d	Z	0
Línea 2 fila 4	X	-3d	Y	-2d	Z	0
Línea 3 fila 4	X	-2d	Y	-2d	Z	0
Línea 4 fila 4	X	-d	Y	-2d	Z	0
Línea 5 fila 4	X	0	Y	-2d	Z	0
Línea 6 fila 4	X	d	Y	-2d	Z	0
Línea 7 fila 4	X	2d	Y	-2d	Z	0
Línea 8 fila 4	X	3d	Y	-2d	Z	0

Tabla 6.11: Creación de líneas de antenas restantes

Tras realizar estas traslaciones, se deben unir todas las líneas existentes a la línea del divisor 1 a 32 al igual que en los casos anteriores, consiguiendo así una única línea de transmisión.

Del mismo modo que se han creado las líneas que corresponden con las antenas de banda ancha, se deben crear las ranuras necesarias, con lo que se obtiene la siguiente figura:

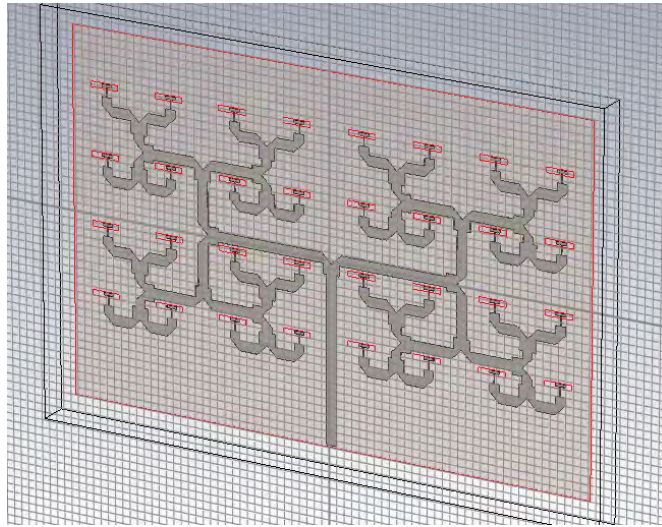


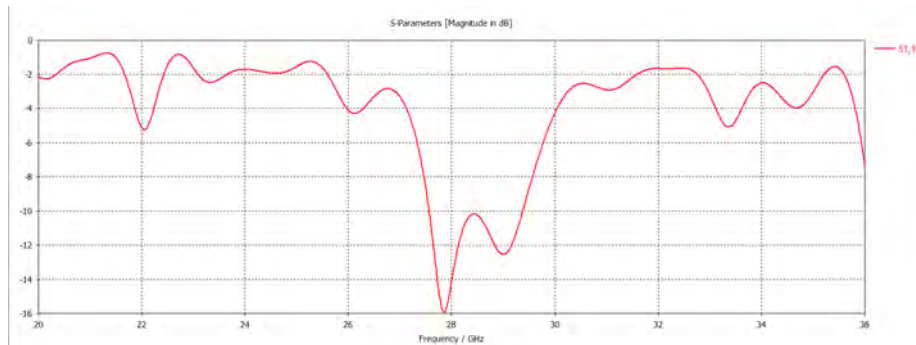
Figura 6.21: Figura array 4 x 8

Tras realizar todas estas configuraciones, se podría realizar la simulación de nuestro array.

6.6.2. Resultados diseño

Tras finalizar el diseño de nuestro array 4 x 8, se realiza la simulación del mismo, obteniendo los siguientes resultados.

Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

Figura 6.22: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 8

Como se puede ver, se obtienen -16 dB a una frecuencia algo inferior a 28 GHz, lo que implica que el diseño hasta este punto se ha realizado correctamente, ya que justamente esta adaptado a 28 GHz, tal y como se pretendía. Además, con este diseño se consigue un ancho de banda de 0.9 GHz a -10 dB, el mismo valor que en el array anterior.

Igualmente, el valor de la impedancia característica no ha cambiado con respecto al caso anterior, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.6\Omega$.

Se obtienen el siguiente diagrama de radiación de nuestro array de antenas de ranura en 3 dimensiones:

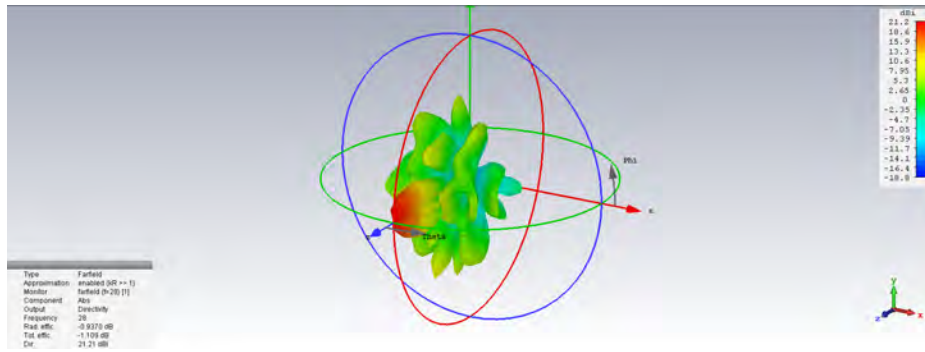


Figura 6.23: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 21.21 dB, y la aparición de varios lóbulos laterales, que siguen estando cerca de los -13 dB lo que indica que la distribución de amplitudes es bastante uniforme tal y como queríamos.

Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

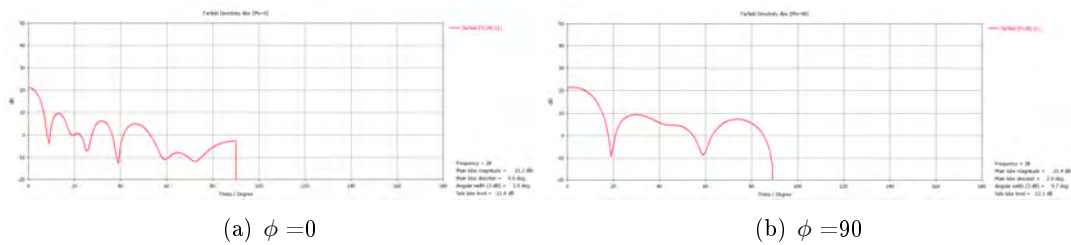


Figura 6.24: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

Como se puede observar, tanto en el plano XZ como en el plano YZ el lóbulo principal proporciona algo mas de 21 dB, y además en ambos casos aparece un lóbulo lateral de 10 dB, por lo que existe unos 11 dB entre el lóbulo principal y el primer lóbulo lateral (secundario), un valor algo menor al esperado (se deberían obtener 13 dB entre ambos lóbulos), pero bastante aceptable.

Para finalizar, se observan los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares:



Figura 6.25: Diagrama de radiación de la antena en polares

Igualmente, en el primer caso el lóbulo principal tiene un ancho de haz entre ceros de 20° aproximadamente, mientras que para el caso de $\phi = 90$ el ancho de haz del lóbulo principal es de 40° , es decir, el doble al caso anterior, esto es lo normal ya que en un plano el array tiene más elementos (y por tanto el haz es más estrecho) que en el otro.

Por lo tanto, se puede concluir que el diseño del array 4 x 8 realizado hasta el momento es bastante bueno.

6.7. Array de antenas de ranura de 8 x 8

6.7.1. Diseño

En esta sección se procede a realizar el diseño del array de antenas de ranura 8 x 8, partiendo del proyecto del divisor 1 a 64 diseñado anteriormente en la sección 5.7 del capítulo 5.

Al igual que en todas las secciones anteriores de este mismo capítulo, se deben crear las nuevas variables que se utilizarán para crear las líneas y ranuras necesarias. Estas variables se definen igual que en la tabla 6.1 de la subsección 6.2.1, tomando los valores obtenidos en el capítulo 4.

En este caso, se debe aumentar el valor de las dimensiones, tanto horizontal como vertical, añadiendo 2 veces la variable tam_{antena} , quedando $A_t = B_t = 80.12mm$, consiguiendo así un diseño cuadrado.

Tras crear estas variables, se deben crear las líneas de las antenas. Para ello, al igual que en las secciones anteriores solamente se crean las líneas de una antena y posteriormente se traslada para el resto de salidas, en este caso solamente se crean las líneas que corresponden a la quinta salida de la cuarta fila superior comenzando por la izquierda del diseño, ya que esta antena tendría la misma configuración que la diseñada en la sección 6.3.

Tras crear las 2 líneas de la antena de banda ancha, se unen ambas líneas en una sola. Posteriormente se procede a trasladar las nuevas líneas de las antenas en el resto de posiciones del array 8 x 8. Para cada nueva traslación que se realice, se sigue el mismo mecanismo que en las secciones anteriores, donde el valor de traslación varía según la posición futura de la línea de la antena.

Tras realizar las traslaciones, se deben unir todas las líneas existentes a la línea del divisor 1 a 64 al igual que en los casos anteriores, consiguiendo así una única línea de transmisión acabada en las 64 antenas creadas recientemente.

Igualmente, se deben crear las ranuras necesarias. Lo que nos proporciona la siguiente figura:

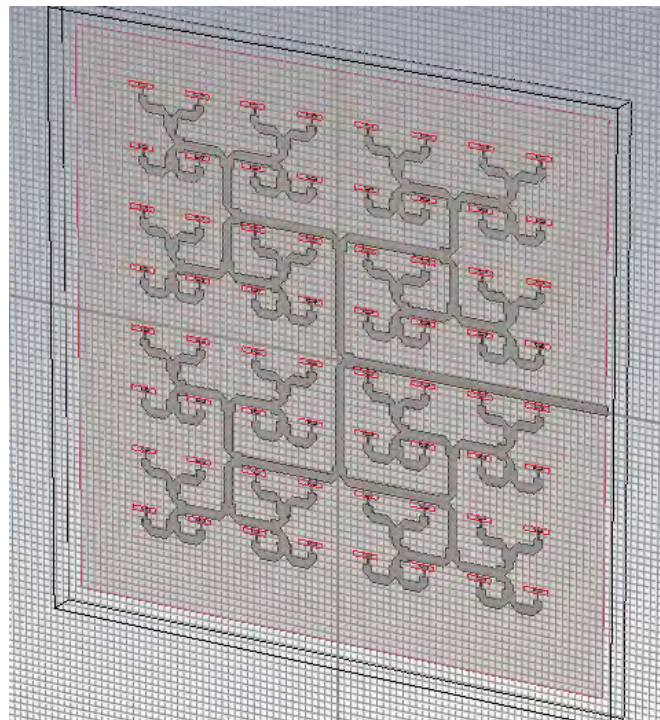


Figura 6.26: Figura array 8 x 8

Tras realizar todas estas configuraciones, se podría realizar la simulación de nuestro array.

6.7.2. Resultados diseño

Se realiza la simulación del diseño de nuestro array 8 x 8, obteniendo los siguientes resultados.

Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

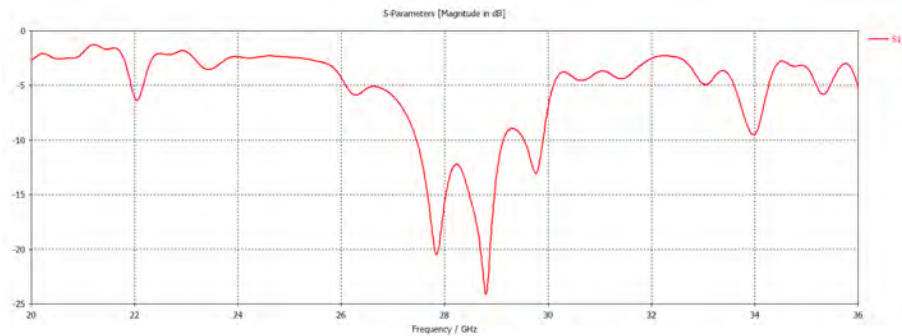


Figura 6.27: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8

Como se puede ver, se obtienen -20 dB a la frecuencia de 28 GHz, pero igualmente se obtienen unos mejores resultados a la frecuencia de 29 GHz, ya que se llegan a conseguir -24 dB. Este resultado (menor coeficiente a 29 GHz en lugar de a 28 GHz), aunque no es exactamente el resultado esperado se considera. De la misma forma, con este diseño se consigue un ancho de banda de 2 GHz a -10 dB.

Como en casos anteriores, el valor de la impedancia característica sigue siendo $Z_{ref} = 49.6\Omega$.

Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

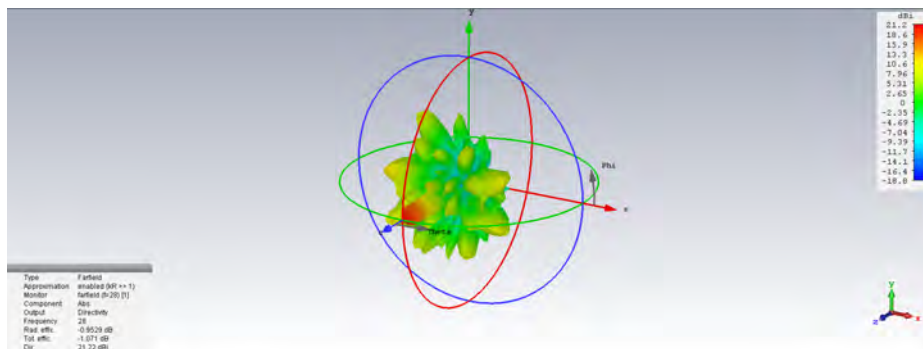


Figura 6.28: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 21.2 dB, y la aparición de varios lóbulos laterales.

Comentar, que este valor es prácticamente el mismo al obtenido en el diseño del array 4 x 8, por lo que no ha aumentado apenas la directividad al aumentar el tamaño del array.

Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

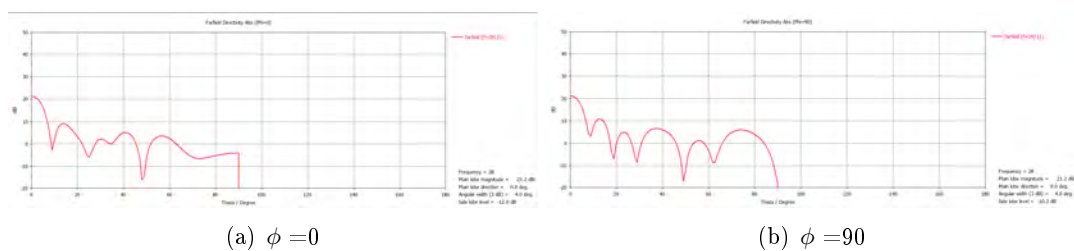


Figura 6.29: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

Tanto en el plano XZ como en el plano YZ el lóbulo principal proporciona 21 dB de directividad, y además en ambos casos se obtienen unos 11 dB entre el lóbulo principal y el primero lóbulo lateral (existe una mínima mayor diferencia entre ambos lóbulos en el plano XZ que en el plano YZ).

Para finalizar, se observan los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares:



Figura 6.30: Diagrama de radiación de la antena en polares

En este caso, a diferencia de lo que ocurría en el array 4 x 8, en ambos diagramas el lóbulo principal tiene 20° de ancho de haz entre ceros, luego al menos el lóbulo principal es simétrico.

Por lo tanto, se puede concluir que el diseño del array 8 x 8 es óptimo, ya que se consigue una gran adaptación del puerto 1 y una mayor directividad a la obtenida en el array 4 x 4, obteniendo a su vez que el lóbulo principal resultante es simétrico, con lo que por el momento, se puede concluir que el diseño y configuración de nuestro array de antenas de ranura es bastante bueno.

6.8. Conclusiones

En este capítulo se han presentado los diferentes arrays de antenas de ranura que se pueden diseñar o construir a partir de las redes de alimentación creadas en el capítulo anterior 5, como pueden ser los arrays 2 x 2, 4 x 4 o finalmente 8 x 8.

Para ello, para cada distinto divisor creado en el capítulo anterior, se han añadido los tramos de línea necesarios (según la configuración obtenida en el diseño de una única antena de ranura), así como sus ranuras correspondientes. Todo ello, se configura para obtener la mayor directividad posible a la frecuencia de trabajo de 28 GHz (observando los resultados en 3D y 2D) y una impedancia característica $Z_{ref} = 50\Omega$.

Por lo tanto, tras crear los distintos arrays de antenas de ranura, se puede finalizar el diseño de los mismos con la introducción de un array de pines que evitan que nuestro diseño radie en la dirección opuesta a la deseada, es decir, para evitar la llamada radiación hacia atrás.

Posteriormente, se realizará el diseño final de los arrays de antenas de ranura 4 x 4 y 8 x 8, ya que de todos los distintos arrays creados durante este proyecto, únicamente se ha decidido realizar el diseño final de estos dos arrays.

Capítulo 7

Diseño de estructura periódica de pines

7.1. Características generales

Con este diseño se espera conseguir una banda prohibida (entre los modos 1 y 2), a la frecuencia de 28 GHz, es decir, debe existir un rango de frecuencias aproximadamente entre los 20 y 36 GHz (unos 10 GHz de distancia a la frecuencia de trabajo) en los que no se debe propagar ningún modo.

Esto es debido a que diseñar el pin con una altura aproximada de $\lambda/4$, hace que la condición de contorno del PEC se transforme en una condición PMC (perfect magnetic conductor) o lo que es lo mismo, en una alta impedancia o circuito abierto. De esta forma se consigue crear esa condición de contorno en un rango de frecuencias.

7.2. Diseño

Para realizar este diseño y poder observar la variación de los distintos modos que aparecen se deben crear las variables y los componentes necesarios.

Por lo tanto, primero se crean los parámetros que posteriormente se utilizarán:

Fase	phase	180
Periodo de la celda unidad	periodo	3 mm
Altura del pin	pin	2 mm
Radio del pin	radio	1 mm
Gap de aire entre pin y sustrato	gap	0.5 mm
Espesor sustrato	t	0.51 mm

Tabla 7.1: Parámetros iniciales pin

Posteriormente a la creación de los parámetros, se crean todos los componentes necesarios:

- **Aire:** Nuestra pin estará rodeado por aire, por lo que se debe crear este componente, teniendo en este caso la misma altura que el pin que posteriormente se creará. En este caso, el aire se creará del material Vacuum.

X_{min}	$-\frac{periodo}{2}$	X_{max}	$\frac{periodo}{2}$
Y_{min}	0	Y_{max}	pin
Z_{min}	$-\frac{periodo}{2}$	Z_{max}	$\frac{periodo}{2}$

Tabla 7.2: Parámetros iniciales de aire

- **Vacuum:** Nuestro Vacuum lógicamente tendrá las mismas dimensiones X y Z que el aire anteriormente definido, creándose de tal forma que se posicionará justo encima del aire anterior y del pin que posteriormente se creará.

X_{min}	$-\frac{periodo}{2}$	X_{max}	$\frac{periodo}{2}$
Y_{min}	pin	Y_{max}	$pin + t$
Z_{min}	$-\frac{periodo}{2}$	Z_{max}	$\frac{periodo}{2}$

Tabla 7.3: Parámetros iniciales de vacuum

- **Pin:** Como ya se ha comentado anteriormente nuestro pin (de material PEC) estará rodeado por los componentes creados anteriormente.

X_{min}	$-\frac{radio}{2}$	X_{max}	$\frac{radio}{2}$
Y_{min}	0	Y_{max}	pin
Z_{min}	$-\frac{radio}{2}$	Z_{max}	$\frac{radio}{2}$

Tabla 7.4: Parámetros iniciales de pin

- **Sustrato:** Nuestro sustrato será del material Rogers RO4003C, el mismo al utilizado en todos los capítulos de este proyecto. En este caso, tendrá el mismo ancho y largo que el vacuum anterior, definiendo su altura de forma que se deja un espacio o gap entre este mismo sustrato y el vacuum anteriormente definido.

X_{min}	$-\frac{periodo}{2}$	X_{max}	$\frac{periodo}{2}$
Y_{min}	$pin + gap$	Y_{max}	$pin + t + gap$
Z_{min}	$-\frac{periodo}{2}$	Z_{max}	$\frac{periodo}{2}$

Tabla 7.5: Parámetros iniciales de sustrato

Tras crear todos los componentes, se deben configurar las condiciones de contorno o *Boundaries* de la siguiente forma:

X_{min}	periodic	X_{max}	periodic
Y_{min}	electric ($E_t=0$)	Y_{max}	electric ($E_t=0$)
Z_{min}	periodic	Z_{max}	periodic

Tabla 7.6: Condiciones de contorno pin

Como se puede observar, se configura de forma periódica en las dimensiones horizontales X y Z (ya que posteriormente se creará un array de pines), y con una nueva opción electric ($E_t = 0$) en la dimensión vertical Y.

Con la configuración de las condiciones de contorno se finaliza el diseño y se procede a la simulación de nuestro pin.

7.3. Optimización de parámetros y resultados

Para realizar la simulación de este diseño se debe ejecutar el Eigenmode Solver Parameters, escogiendo el método AKS y 5 modos y utilizando la opción Parameters Sweep, realizando una secuencia de tipo Linear Sweep desde 0.1 a 180 utilizando 15 muestras (samples).

Inicialmente, se realizan 2 simulaciones distintas, variando el valor del gap, en este caso a 0.5 mm y 1 mm respectivamente. Lo que proporciona los siguientes diagramas de dispersión:

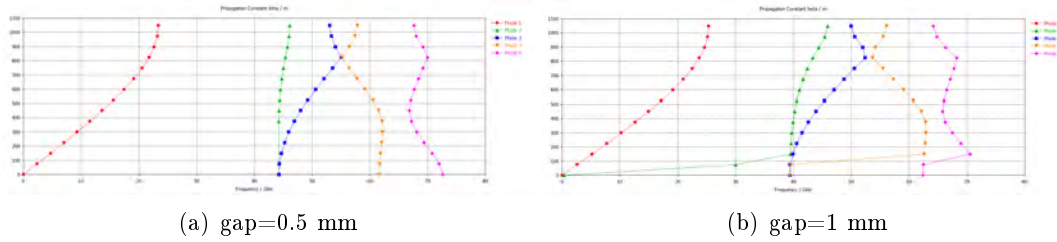


Figura 7.1: Diagramas de dispersión

En el caso del $\text{gap} = 0.5 \text{ mm}$, tal y como se esperaba, se obtiene una banda prohibida en torno a los 28 GHz (entre los 23 GHz y los 44 GHz), ya que el modo 1 finaliza a los 23 GHz y el modo 2 comienza a los 44 GHz, por lo que aunque se consigue una banda de guarda un poco forzada por el límite inferior, se encuentra dentro de los límites aceptables.

Mientras que en el caso del $\text{gap} = 1 \text{ mm}$, la banda prohibida se reduce un poco y va de los 25 GHz hasta los 39 GHz, por lo que se realizan más pruebas utilizando este mismo valor de gap, variando en este caso la altura del pin a utilizar, utilizando un pin de altura de 2.2 mm y 2.5 mm:

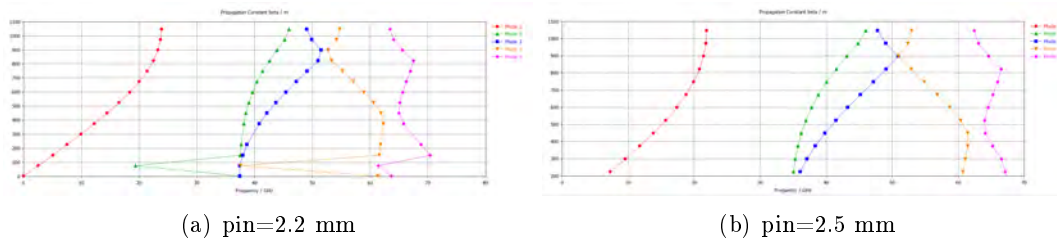


Figura 7.2: Diagrama de dispersión con gap de 1 mm

Utilizando un pin de 2.2 mm de altura, la frecuencia inicial de la banda prohibida disminuye, y la frecuencia final va hasta los 37 GHz. Mientras que si se utiliza un pin de 2.5 mm de altura, se consigue una banda prohibida en torno a los 28 GHz, aunque en este caso, entre los 22 GHz y los 35 GHz, por lo que esta configuración es más que aceptable. Debido a ello, se realiza una nueva prueba, pero variando la periodicidad de los pines, en esta ocasión a $\text{periodo} = 2 \text{ mm}$, con lo que se obtiene:

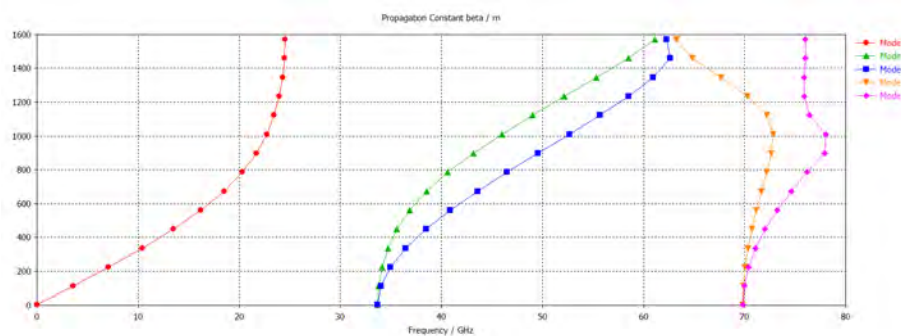


Figura 7.3: Diagrama de dispersión con altura de pin de 2.5 mm y periodicidad de 2 mm

Como se puede observar, con este nuevo periodo, se reduce la banda prohibida, pero nuestra frecuencia de interés queda en el centro de la misma, por lo que también cumple las exigencias.

Tras realizar todas estas pruebas y comparar los resultados obtenidos, se decide que en apartados sucesivos

se va a utilizar un pin de 2 mm de altura (tal y como estaba configurado inicialmente), periodicidad de 3 mm y un gap de 1 mm.

7.4. Conclusiones

En este capítulo se ha explicado la configuración que se debe seguir en los capítulos sucesivos para la creación de una estructura de pines en los arrays de antenas 4 x 4 y 8 x 8 para conseguir que nuestra antena no tenga radiación trasera, por lo que se consigue que la antena sea más directiva, a la vez que se evitan acoplos entre las líneas de la red de alimentación que han quedado muy cerca.

Por lo tanto, tras comprender como se debe realizar este diseño, se procede a añadir esta parte a los arrays de antenas de ranura anteriormente creados.

Capítulo 8

Array de antenas de ranura 4 x 4

En este capítulo se va a realizar el diseño final del array de antenas de ranura 4 x 4, añadiendo los pines para evitar la radiación hacia atrás y realizando todas las variaciones en el diseño necesarias para conseguir que los resultados sean óptimos.

8.1. Array de antenas 4 x 4

En esta sección se va a diseñar el array final de antenas de ranura 4 x 4, partiendo del diseño ya realizado en la sección 6.5 del capítulo 6.

En este caso, simplemente se debe añadir al diseño existente una estructura periódica de pines que eviten que nuestra antena radie hacia atrás, cambiando a su vez las condiciones de contorno de nuestra simulación y poniendo unas que simulan lo que pasa en una situación real.

8.1.1. Diseño

Como ya se comentado anteriormente, se va a proceder a la creación de un array de pines, que eviten la radiación hacia atrás. Por ello, inicialmente se procede a cambiar las condiciones de contorno o *Boundaries*.

Al comienzo del diseño de este proyecto, concretamente en el capítulo 3, se configuraron las condiciones de contorno de tal forma que nuestro diseño no radiará hacia Zs negativas, es decir, hacia atrás. Esta función, ahora la va a realizar el array de pines que se va a crear, por lo que se deben volver a cambiar las *Boundaries* a su valor inicial, es decir, todos los campos deben utilizar la opción open (add space), configurando el array de antenas de tal forma que radie hacia todo el espacio.

Tras realizar este cambio de configuración, se modifica el valor de las dimensiones horizontal y vertical de nuestro array de antenas, es decir, los parámetros A_t y B_t . En este caso, ambos campos tendrán el nuevo valor $A_t = B_t = 43.00mm$, por lo que se puede borrar el parámetro tam_{antena} de nuestro diseño.

Posteriormente, se crean las nuevas variables que se utilizarán para crear los pines, que en este caso son:

Espacio entre Sustrato (Rogers) y pines	gap	1 mm
Altura de pines	h_{pin}	2 mm
Anchura de pines	l_{pin}	1 mm
Distancia entre pines	d_{pin}	3 mm

Tabla 8.1: Parámetros de pines

Tras crear las variables, se procede a la creación del array de pines, para ello, inicialmente se debe crear el metal que une dichos pines y sobre el que estarán colocados.

Este metal de pines estará formado por un PEC (de inicialmente espesor nulo), que se posicionará detrás del sustrato a una distancia gap más la altura del pin.

X_{min}	$-\frac{A_t}{2}$	X_{max}	$\frac{A_t}{2}$
Y_{min}	$-\frac{B_t}{2}$	Y_{max}	$\frac{B_t}{2}$
Z_{min}	$-h - gap - h_{pin}$	Z_{max}	$-h - gap - h_{pin}$

Tabla 8.2: Parámetros iniciales de metal de pines

Una vez creado el metal de pines, y antes de crear dichos pines, se debe calcular el posible número de pines que se pueden crear, así como su posición.

Como el metal tiene una longitud de 43 mm, un pin mide 1 mm y entre el inicio de los pines existe un espacio de 3 mm, si se colocará el inicio del primer pin en el borde del metal, se podrían crear 15 pines, quedando justamente el ultimo pin creado en el otro extremo del metal. Esto es, el primer pin ocupará el espacio del metal desde 0 mm a 1 mm, el segundo de 3 mm a 4 mm, y así hasta el ultimo pin, que ocupará de 42 mm a 43 mm del metal de pines.

Por lo tanto, tras realizar este cálculo, se procede a crear los pines, para ello, simplemente se crea un pin y posteriormente se traslada para crear los siguientes.

El primer pin creado irá posicionado en la esquina superior izquierda del metal de pines, de la siguiente forma:

X_{min}	$-\frac{A_t}{2}$	X_{max}	$-\frac{A_t}{2} + l_{pin}$
Y_{min}	$\frac{B_t}{2} - l_{pin}$	Y_{max}	$\frac{B_t}{2}$
Z_{min}	$-h - gap - h_{pin}$	Z_{max}	$-h - gap$

Tabla 8.3: Parámetros iniciales de pin

Tras crear el primer pin, se traslada para crear el resto hasta cubrir todo el metal de pines, que como ya se ha comentado contado con un array de pines 15 x 15, obteniendo la siguiente figura:

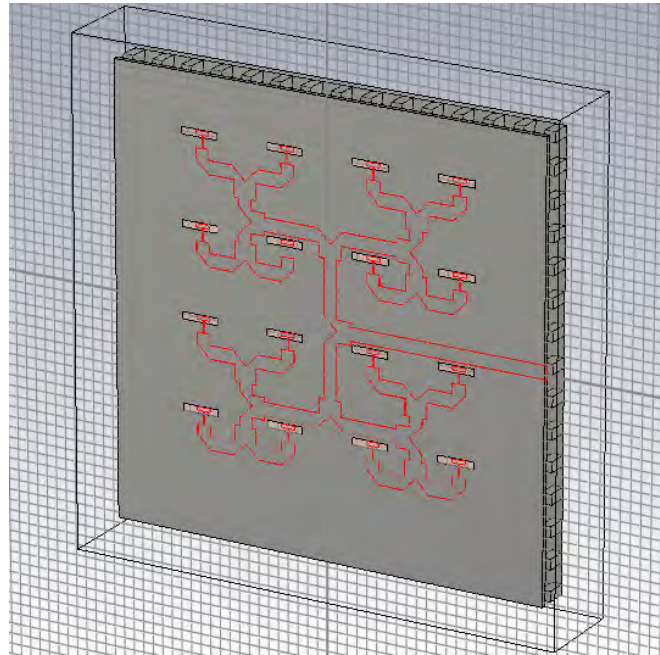


Figura 8.1: Figura array de antenas 4 x 4

Por lo tanto, ya se puede realizar la simulación de este nuevo array de antenas de ranura.

8.1.2. Resultados diseño

Tras finalizar el diseño de nuestro array 4 x 4, se realiza la simulación utilizando el simulador en el dominio del tiempo "Setup Solver".

Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

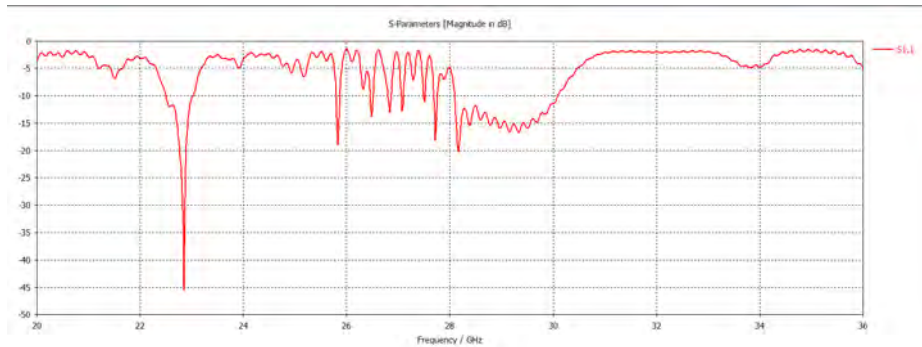


Figura 8.2: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4

Como se puede ver, a los 28.2 GHz se obtiene un pico de -20 dB. Comparando estos resultados con los obtenidos en la sección 6.5 del capítulo 6, se puede concluir que ahora se obtienen mejores resultados de Γ , ya que se pasa de obtener -15 dB en el caso anterior a los actuales -20 dB.

Igualmente, se puede ver la impedancia característica que se ha obtenido con esta nueva configuración:

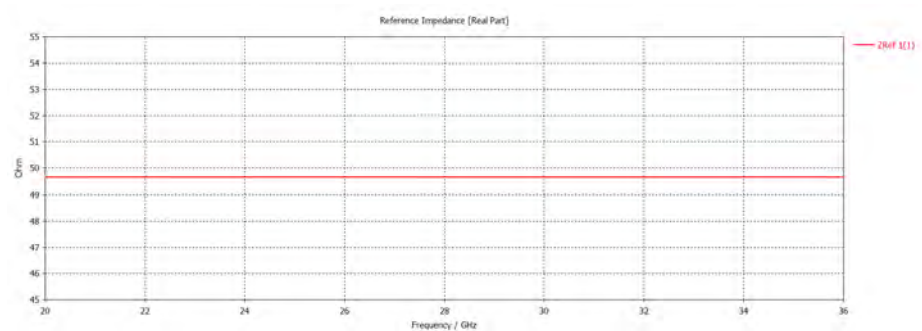


Figura 8.3: Impedancia característica array de antenas de ranura 4 x 4

Se puede observar que el valor de la impedancia característica no ha cambiado con respecto al caso anterior, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.7\Omega$.

Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

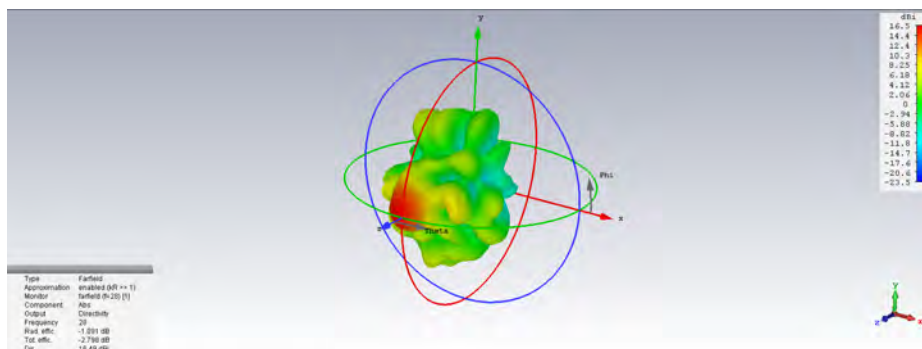


Figura 8.4: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 16.49 dB, y la aparición de varios lóbulos laterales.

Comentar que la directividad que proporciona el diseño apenas varía su valor, ya que solo se ve decrementada en aproximadamente 1 dB respecto a la sección 6.5 del capítulo 6.

Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

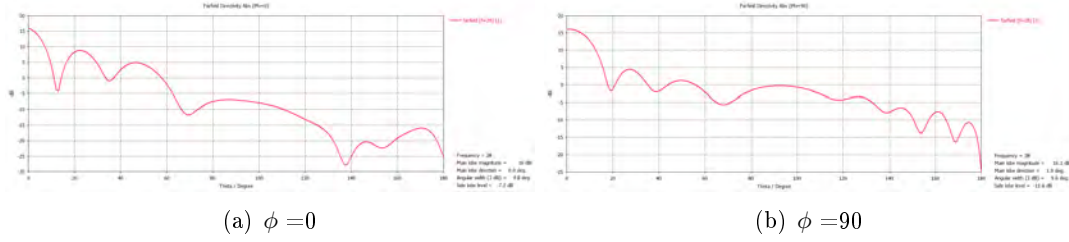


Figura 8.5: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

Como se puede observar, en el plano XZ el lóbulo principal proporciona 16 dB, apareciendo el primer lóbulo lateral a casi 9 dB, por lo que entre ambos lóbulos existen solamente 7.2 dB, un valor bastante lejano de los 13 dB que deben existir. Mientras que en el plano YZ, el lóbulo principal sigue proporcionando 16 dB, pero en este caso, el primer lóbulo lateral (lóbulo secundario) proporciona 4.5 dB, por lo que existen unos 11.6 dB entre ambos lóbulos, un valor mucho mejor que en el plano anterior XZ y bastante cercano al esperado.

Para finalizar, se observan los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares, tanto con $\phi = 0$, como con $\phi = 90$.

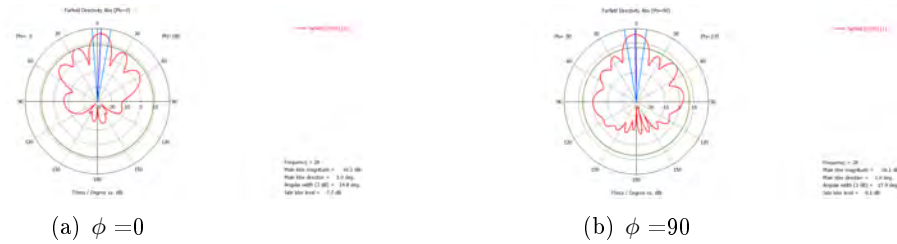


Figura 8.6: Diagrama de radiación de la antena en polares

En este caso, el lóbulo principal llega hasta los 18° aproximadamente y el lóbulo secundario se encuentra entre los 18° y los 42° . Estos resultados se ven un poco distorsionados en el caso en que se fija $\phi = 90$, aunque con valores muy cercanos, ya que por ejemplo el lóbulo secundario se encuentra entre los 18° y los 35° .

8.2. Pruebas de pines en diseño array 4 x 4

Para comprobar el buen funcionamiento de los pines creados, se va a realizar la simulación sin utilizarlos, pero con la misma configuración de las condiciones de contorno, es decir, con todas las *Boundaries* configuradas como open (add space).

Para ello, se van a realizar dos simulaciones distintas, la primera utilizando solamente el mismo metal de los pines (pero sin los pines) y la segunda sin utilizar dicho metal de pines.

Tras realizar la primera simulación, solamente añadiendo el metal, se obtienen los siguientes resultados:

- Parámetro S_{11} :

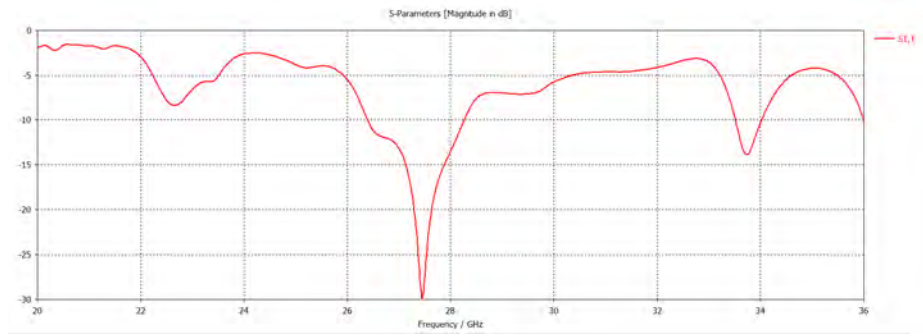


Figura 8.7: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4 sin pines

Como se puede ver, se obtienen -30 dB a una frecuencia de 27.5 GHz, con un ancho de banda de 1.9 GHz a -10 dB.

- La impedancia característica no ha cambiado con respecto al caso anterior, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.7\Omega$.
- Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

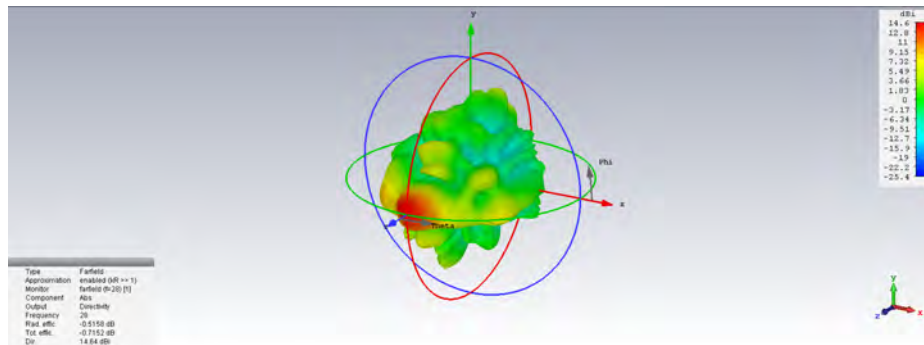


Figura 8.8: Diagrama de radiación de la antenna sin pines en 3 dimensiones

En este caso, a 28 GHz se obtienen 14.64 dB de directividad, 2 dB por debajo de la obtenida cuando se usan los pines.

Pero lo más importante en este caso, es la radiación producida hacia atrás:

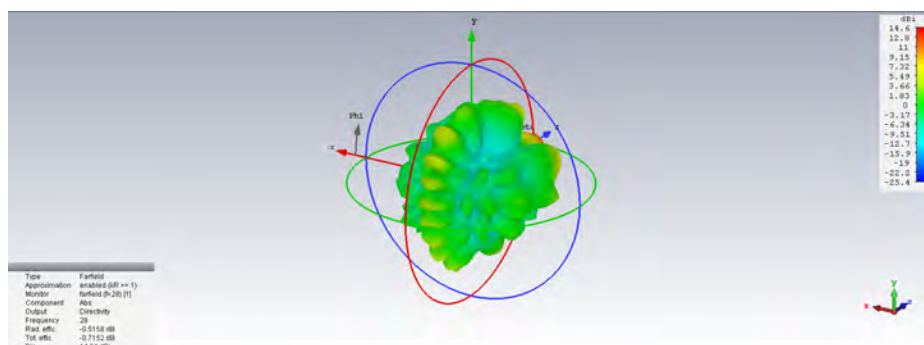


Figura 8.9: Diagrama de radiación hacia atrás de la antenna sin pines en 3 dimensiones

Como se puede ver, aunque no existe ningún lóbulo posterior (opuesto al lóbulo principal), existen varios lóbulos que radian en la dirección opuesta (hacia atrás). Esto es debido a que pese a la

colocación del metal, no surge ningún efecto si no se colocan los pines. Estos resultados se podrán apreciar mejor en la figura del diagrama de radiación en coordenadas polares.

- Diagrama de radiación en 2 dimensiones en cartesianas:

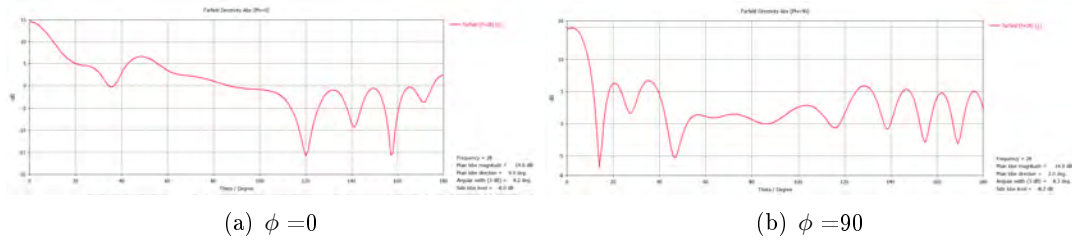


Figura 8.10: Diagrama de radiación de la antena sin pines en cartesianas

Como se puede ver, con esta nueva configuración, existen grandes desviaciones (hasta -15 dB) a partir de los 90° en ambos planos. Esto destaca en contraposición con el caso anterior, en el que las desviaciones eran más leves.

- Diagrama de radiación en polares:



Figura 8.11: Diagrama de radiación de la antena sin pines en polares

Se puede observar, al igual que en los planos en 2 dimensiones, que los lóbulos que radian en dirección opuesta, en esta ocasión son mucho más grandes y con cambios más drásticos.

Por lo tanto, se puede concluir que quitando los pines no se consigue evitar la radiación hacia atrás, ya que aparecen más lóbulos en dirección opuesta y de mayor tamaño.

Al realizar la segunda simulación, sin el metal de pines, se obtienen los siguientes resultados:

- Parámetro S_{11} :

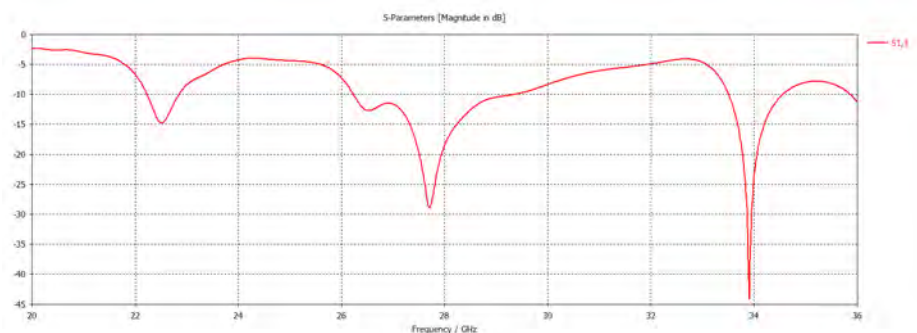


Figura 8.12: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4 sin metal de pines

Como se puede ver, se consiguen -29 dB a la frecuencia de 27.7 GHz.

- El valor de la impedancia característica no cambia con respecto al diseño en el que si se usan los pines, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.7\Omega$.
- Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

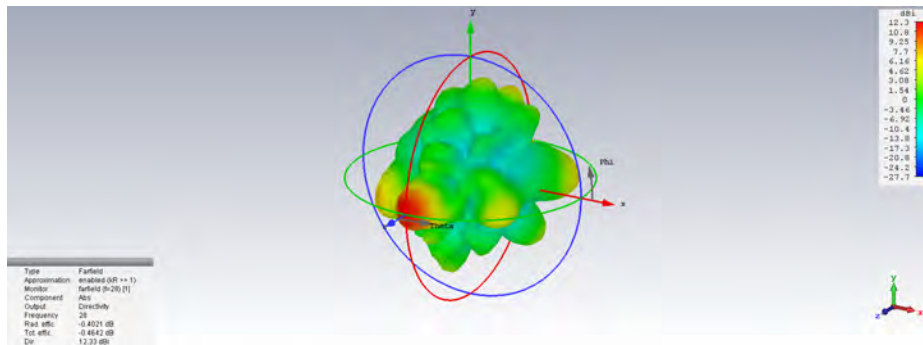


Figura 8.13: Diagrama de radiación de la antenna sin metal de pines en 3 dimensiones

En este caso, a 28 GHz se obtienen 12.33 dB de directividad, 4 dB por debajo de la obtenida cuando se usan los pines y 2 dB menos con respecto al caso en el que se usa metal sin pines.

Pero al igual que en la simulación anterior, el análisis principal es de la radiación producida hacia atrás:

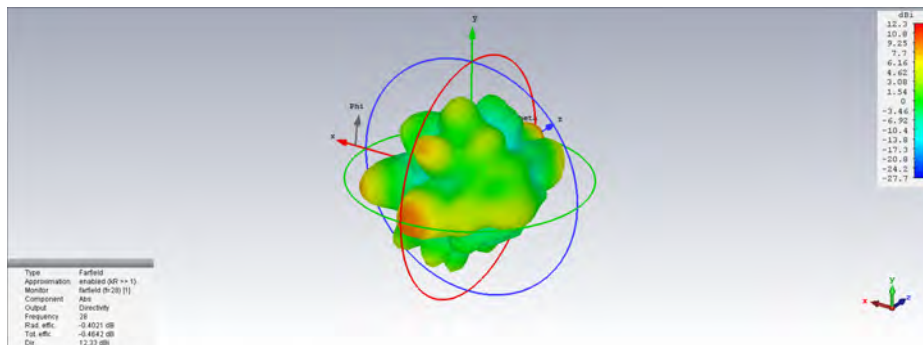


Figura 8.14: Diagrama de radiación hacia atrás de la antenna sin metal de pines en 3 dimensiones

Como se puede ver, con esta nueva configuración existe un lóbulo posterior (opuesto al lóbulo principal), así como varios lóbulos laterales más que radian hacia atrás. Esto es debido a que al no colocar nada y mantener las condiciones de contorno como open (add space), la antenna radia en todas direcciones. Estos resultados se pueden apreciar mejor en la figura del diagrama de radiación en coordenadas polares.

- Diagrama de radiación en 2 dimensiones:

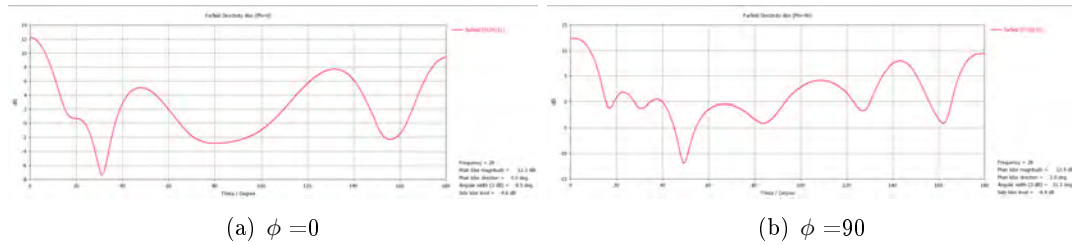


Figura 8.15: Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en cartesianas

Como se puede ver, existen grandes desviaciones (de hasta 9 dB) a 180° perteneciente al lóbulo posterior.

- Diagrama de radiación en polares:



Figura 8.16: Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en polares

Se puede observar, al igual que en los planos en 2 dimensiones, que los lóbulos que radian en dirección opuesta son mucho más grandes, en especial el lóbulo posterior de 9 dB.

Se puede concluir que quitando el metal de pines no solo no se consigue evitar la radiación hacia atrás, sino que aparecen muchos más lóbulos en dirección opuesta e incluso un gran lóbulo posterior.

Por lo tanto, no solo no es recomendable quitar los pines o el metal de los mismos, sino que se ha demostrado que es totalmente necesario colocar los pines para evitar en la manera de lo posible la radiación hacia atrás, ya que sin ellos llega a aparecer un gran lóbulo posterior opuesto al lóbulo principal.

8.3. Array final de antenas 4 x 4

8.3.1. Diseño final array 4 x 4

Para finalizar el diseño de nuestro array, se debe conseguir que el diagrama de radiación sea simétrico, para ello simplemente se deben realizar unos mínimos cambios en las dimensiones para conseguir que exista la misma distancia entre la ultima ranura y el borde del metal tanto en la parte superior como inferior, e igualmente en la dimensión horizontal para obtener una figura de array de antenas cuadrada; partiendo siempre del diseño del array 4 x 4 del que ya disponemos.

Por otro lado, para este diseño final, se configuran probes (sondas) para comprobar que la amplitud y fase del campo eléctrico creado es el mismo en cada ranura. Para ello, mediante la herramienta “Pick Point” se selecciona el medio de las líneas horizontales de la ranura (en este caso, de la ranura superior izquierda) y posteriormente se selecciona Probes \Rightarrow New Probe, creándola con campo E-field y orientación Y.

Tras crear esta primera sonda, al igual que se realizó con las ranuras, se desplaza al resto de posiciones necesarias para configurarlas en las 16 ranuras. En este caso, esta primera sonda se traslada con factor de traslación 3 y vector $X = d_{pin}$, creando así las sondas de la primera fila. Tras esto, se seleccionan las 4

sondas creadas y se trasladan con factor de traslación 3 y vector $Y = -d_{pin}$, creando de esta forma todas las sondas necesarias.

Con esta ultima configuración, ya se ha concluido el diseño de nuestro array de antenas de ranura 4 x 4, por lo que se puede realizar la simulación final.

8.3.2. Resultados diseño final array 4 x 4

Tras finalizar el diseño final de nuestro array 4 x 4, se realiza la simulación del array 4 x 4.

Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

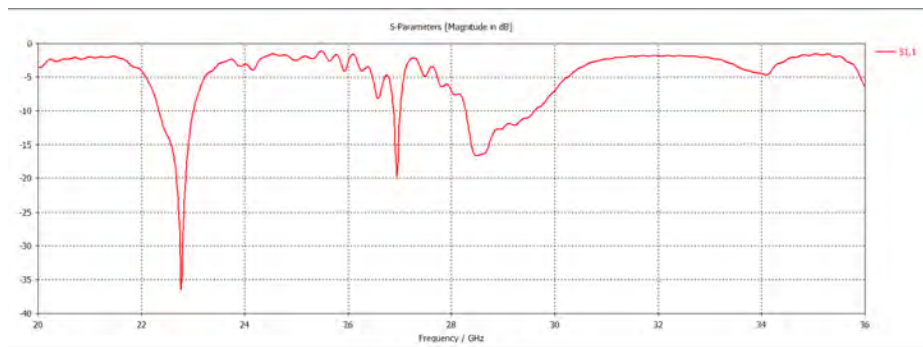


Figura 8.17: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4

Con el nuevo cambio de diseño, se obtienen -20 dB a 27 GHz, consiguiendo además un ancho de banda de 0.2 GHz a -10 dB.

Igualmente, el valor de la impedancia característica no cambia con respecto al caso anterior, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.7\Omega$, tal y como se esperaba.

Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

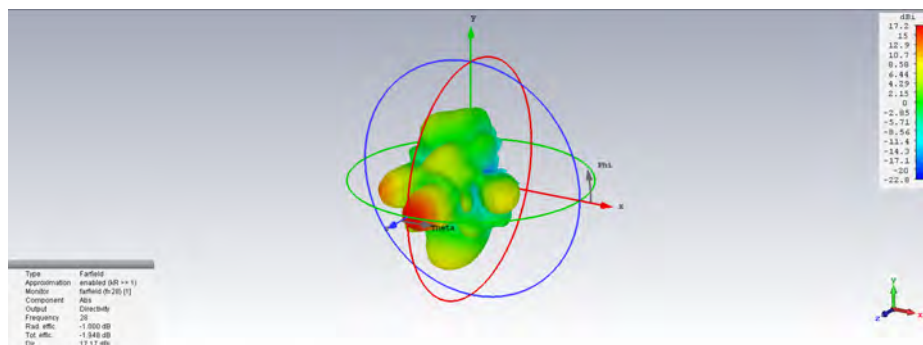


Figura 8.18: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 17.17 dB, 0.7 dB más a los obtenidos en la subsección 8.1.2 antes de eliminar el metal sobrante del diseño. Por lo tanto, el nuevo diseño mejora la prestaciones de directividad de nuestra antena.

Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

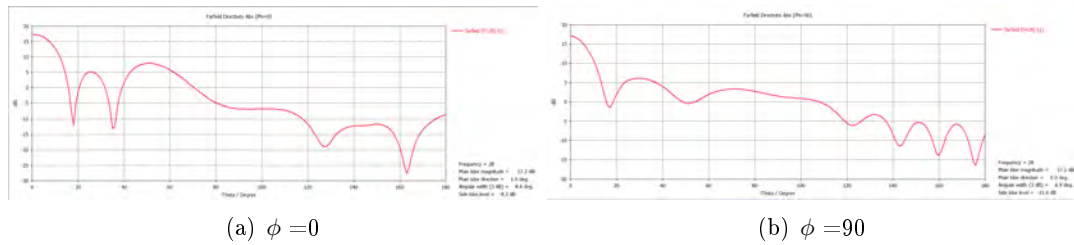


Figura 8.19: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

En este caso, el plano XZ y el plano YZ son prácticamente iguales, en ambos casos el lóbulo principal proporciona 17.2 dB, apareciendo el primer lóbulo lateral a 6 dB, por lo que entre ambos lóbulos existen 11 dB, un valor bastante cercano a los 13 dB que deberían existir.

Para finalizar, se observan los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares:



Figura 8.20: Diagrama de radiación de la antena en polares

En el caso de $\phi = 0$ se puede apreciar claramente la aparición de un lóbulo principal (entre los -18° y 18°) y 2 lóbulos laterales a cada lado, donde estos no siguen una distribución ni uniforme ni simétrica, tal y como se deseaba. Igualmente se puede apreciar los lóbulos opuestos que aparecen con este diseño. Mientras que en el caso de $\phi = 90$, aparte del lóbulo principal aparecen varios lóbulos laterales, aunque en esta ocasión los resultados obtenidos están muy distorsionados.

Para finalizar el análisis de los resultados, se deben comentar las variaciones de amplitud y fase del campo que se obtienen tras la colocación de las distintas sondas en las ranuras del array de antenas.

Las amplitudes y fases de los campos obtenidas no son iguales entre si a 28 GHz, tal y como debería ser, sino que varían entre si.

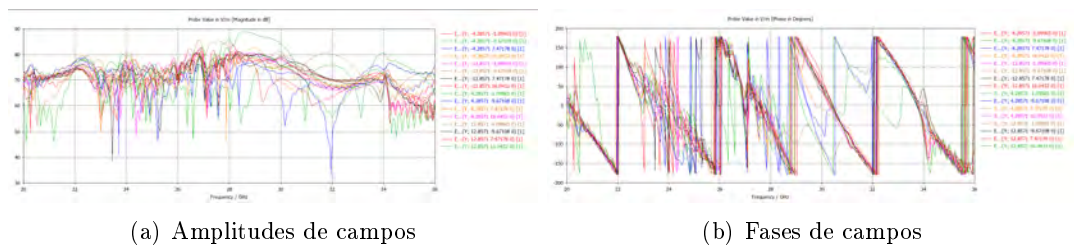


Figura 8.21: Resultados de amplitudes y fases de campo tras colocación sondas

Esta variación se observa principalmente en las sondas correspondientes a las ranuras donde existen cercanía entre las líneas. Principalmente existen 6 casos donde las líneas correspondientes a las antenas están muy cercanas a otras líneas de la fuente de alimentación (sin que se produzca solapamiento), que implica que se produzcan interferencias entre las mismas y provocan que existan valores de amplitud más bajos (entre 60-75 dB a 28 GHz) a los obtenidos en otras sondas donde no existen dichas interferencias (entre 75-85 dB a 28 GHz) ya que no hay cercanía entre varias líneas de transmisión. Estas interferencias entre las líneas producen que exista una mayor variación de amplitudes de campo en las diferentes ranuras.

En el caso de las fases de los campos obtenidos, los resultados son bastante parecidos, pero al igual que ocurre con la amplitud, existe una gran variación debido a los interferencias producidas por las líneas. Aunque es difícil de observar a simple vista, todas las fases producidas están en un rango de 100° en los 28 GHz.

Comparando estas amplitudes y fases con los resultados obtenidos en la simulación de este mismo array 4 x 4 pero usando PMC (Conductor Magnético Perfecto) se pueden observar varias diferencias importantes:

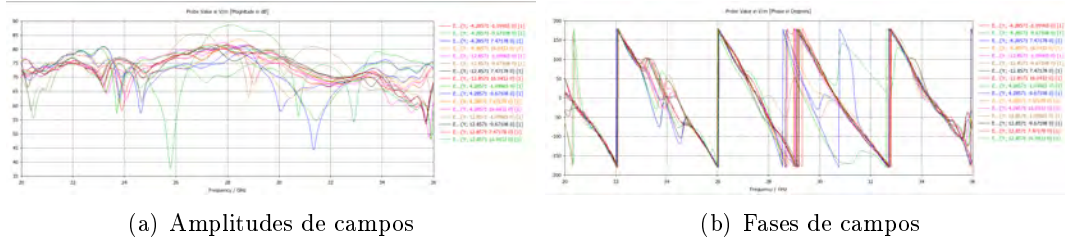


Figura 8.22: Resultados de amplitudes y fases de campo array 4 x 4 PMC

Cuando se configuraba el programa CST para usar PMC en lugar de utilizar los pines, las amplitudes obtenidas sufren muchas menos variaciones en la frecuencia (especialmente en las frecuencias centrales) y además el rango en el que se encuentran dichas amplitudes a 28 GHz es menor, ya que la mayoría de amplitudes de las líneas de campo creadas se encuentran entre los 76 dB y 82 dB.

Al igual que ocurre en el caso de las amplitudes, las fases de los campos creados sufren menos variaciones en la frecuencia que cuando se utilizan los pines. E igualmente, se encuentran en un rango menor (entre -30° y -80°) usando PMC que cuando se usan los pines.

Por lo tanto, se puede concluir que el diseño del array 4 x 4 nos aporta una gran adaptación en el puerto 1 y una gran directividad (aunque aparecen varios lóbulos laterales que distorsionan el envío de la señal y varios lóbulos hacia atrás, aunque de menor tamaño).

8.4. Pruebas finales array 4 x 4

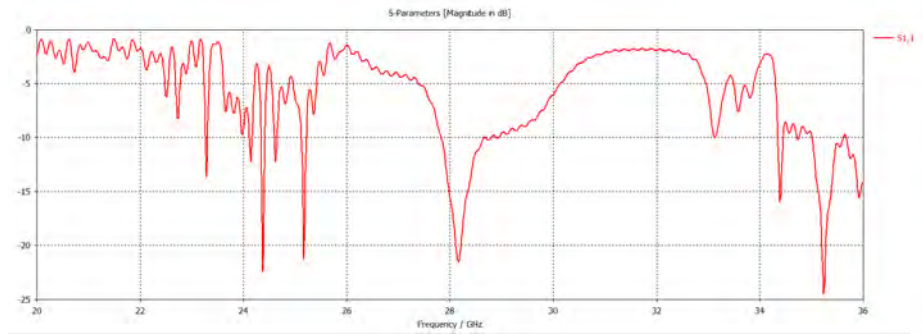
Los resultados no son tan buenos como se esperaban, debido a ello, se va a realizar una nueva simulación tras variar algunos componentes del diseño.

Se procede a variar el periodo y la altura de los pines, tal y como se comentó en el capítulo 7 que podría ocurrir, en este caso, sus nuevos valores serán $pin = 2.5mm$ y $periodo = 2mm$.

Este cambio de periodo provoca que haya que cambiar la configuración de los pines, ya que ahora solamente deben estar desplazados 0.8139 mm hacia abajo y hacia la derecha desde el borde superior izquierdo del metal. Tras realizar este cambio, se añaden los nuevos pines que sean necesarios para completar el array, obteniendo en este caso un array de pines 18 x 18.

Finalmente, tras realizar este nuevo cambio en el diseño del array 4 x 4, se procede a realizar una nueva simulación, con la que se obtienen los siguientes resultados:

- Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

Figura 8.23: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4

Con el nuevo cambio de diseño, se obtienen -21.1 dB a una frecuencia de 28.15 GHz, es decir, el pico del parámetro Γ se consigue a prácticamente los 28 GHz, tal y como se desea. Además con este diseño se consigue un ancho de banda de exactamente 1 GHz a -10 dB.

- La impedancia característica no cambia con respecto al caso anterior, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.7\Omega$.
- Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

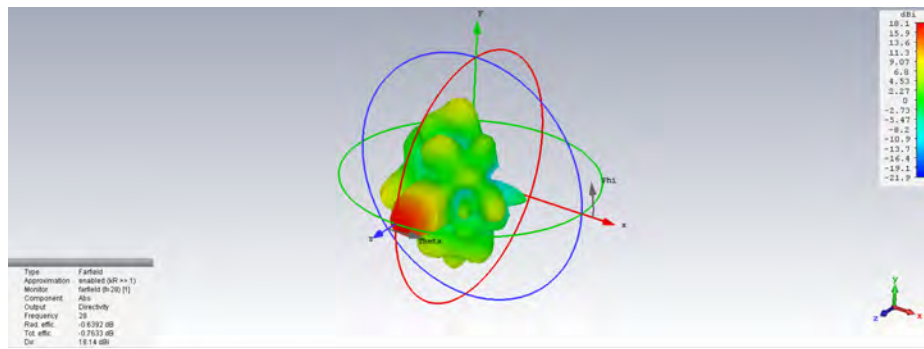


Figura 8.24: Diagrama de radiación de la antenna en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 18.12 dB, prácticamente 1 dB más a los obtenidos en la subsección anterior 8.3.2 antes de variar la altura y periodo de los pines del diseño. Por lo tanto, el nuevo diseño mejora la prestaciones de directividad de nuestra antenna, aunque solamente mejora levemente.

- Se obtiene el siguiente diagrama en coordenadas cartesianas:

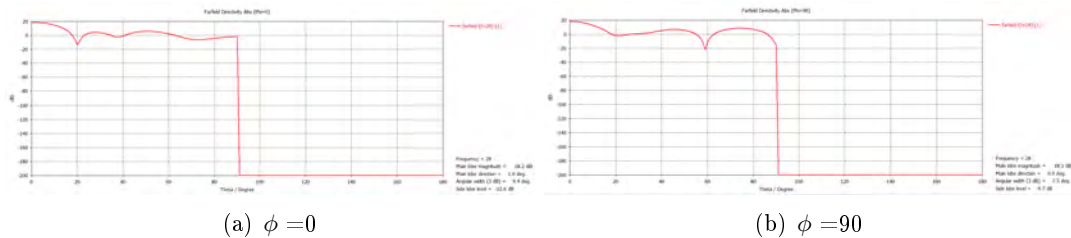


Figura 8.25: Diagrama de radiación de la antenna en plano XZ

En este caso, el plano XZ y el plano YZ son prácticamente iguales, en ambos casos el lóbulo principal

proporciona algo mas de 18 dB, apareciendo el primer lóbulo lateral a unos 6 dB, por lo que entre ambos lóbulos existen 12.6 dB, un valor muy próximo a los 13 dB que deberían existir.

- Se obtiene el siguiente diagrama en polares:

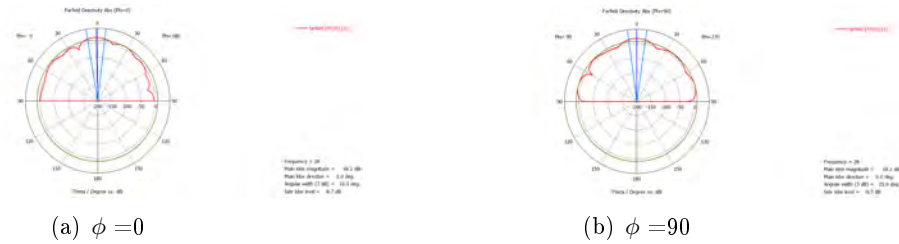


Figura 8.26: Diagrama de radiación de la antenna en polares

En el caso de $\phi = 0$ se puede apreciar claramente la aparición de un lóbulo principal (entre los -19° y 17°) y varios lóbulos laterales a cada lado. Con este nuevo diseño se puede apreciar como se ha eliminado la aparición de lóbulos opuestos, es decir, se ha conseguido eliminar la radiación hacia atrás.

En el caso de $\phi = 90$, los resultados obtenidos son bastante parecidos a los del caso de $\phi = 0$, por lo tanto se ha conseguido un diagrama de radiación que aunque no es perfectamente simétrico tiene una gran simetría.

- Para finalizar el análisis de los resultados, se deben comentar las variaciones de amplitud y fase del campo que se obtienen tras la colocación de las distintas sondas en las ranuras del array de antenas:

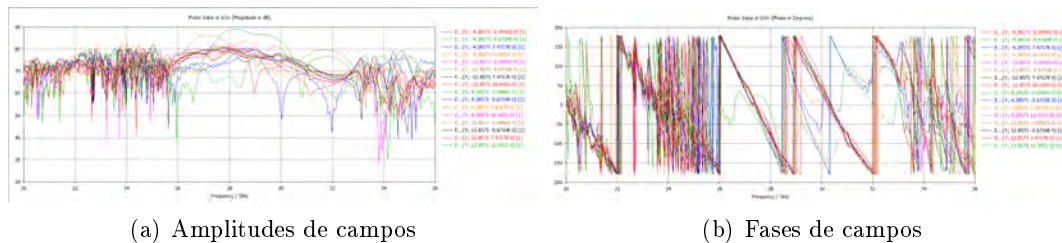


Figura 8.27: Resultados de amplitudes y fases de campo tras colocación sondas

Al igual que en el caso anterior, se observa una variación de la amplitud en las sondas correspondientes a las ranuras donde existen cercanía entre las líneas, siendo más distantes a los obtenidos en otras sondas donde no existen dichas interferencias (entre 74-81 V/m a 28 GHz) ya que no hay cercanía entre varias líneas de transmisión.

En el caso de las fases de los campos obtenidos, los resultados son bastante parecidos, pero al igual que ocurre con la amplitud, existe una gran variación debido a los interferencias producidas por las líneas. La mayoría de las fases producidas están en un rango de 50° , entre los -60° y los -110° en los 28 GHz.

Con esta configuración los resultados han mejorado, por lo que se va a realizar una última simulación manteniendo los pines de $pin = 2.5mm$, pero volviendo a utilizar un periodo entre pines de $periodo = 3mm$.

Tras realizar este nuevo cambio en el diseño del array 4 x 4, se procede a realizar una nueva simulación, con la que se obtienen los siguientes resultados:

- Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

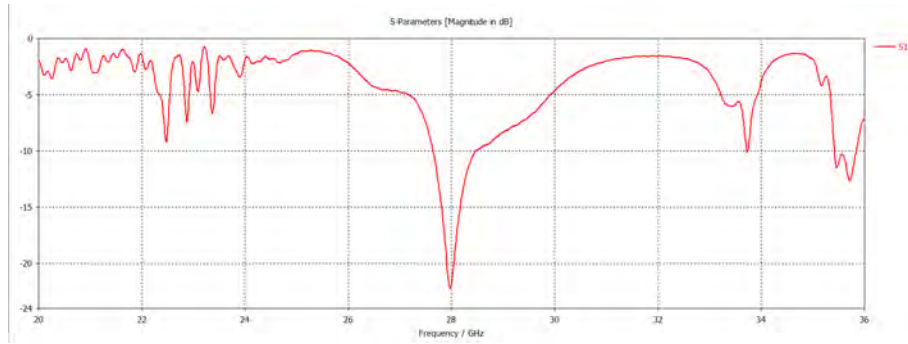


Figura 8.28: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 4 x 4

Con el nuevo cambio de diseño, se obtienen -22.25 dB a una frecuencia de prácticamente 28 GHz, es decir, el pico o descenso que sufre Γ se encuentra centrado a la frecuencia de trabajo deseada, consiguiendo además un ancho de banda de 0.8 GHz a -10 dB.

- La impedancia característica que se ha obtenido con esta nueva configuración, al igual que en los casos anteriores es $Z_{ref} = 49.7\Omega$.
- Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

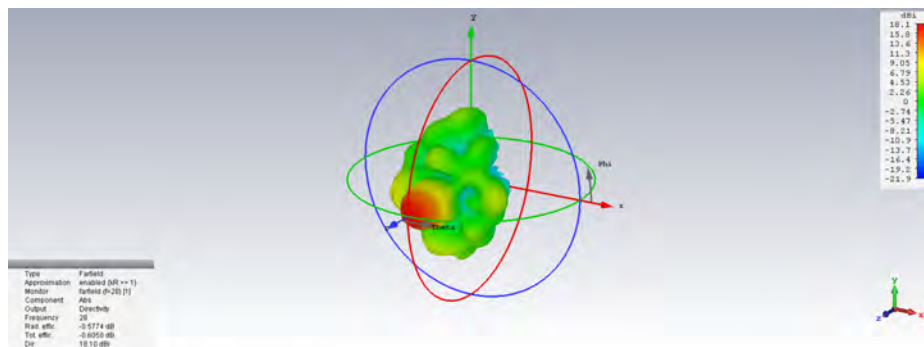


Figura 8.29: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 18.10 dB, 1 dB más a los obtenidos en la subsección 8.3.2, y los mismos dB a los obtenidos con la utilización del otro periodo entre pines.

- Se obtiene el siguiente diagrama en coordenadas cartesianas:

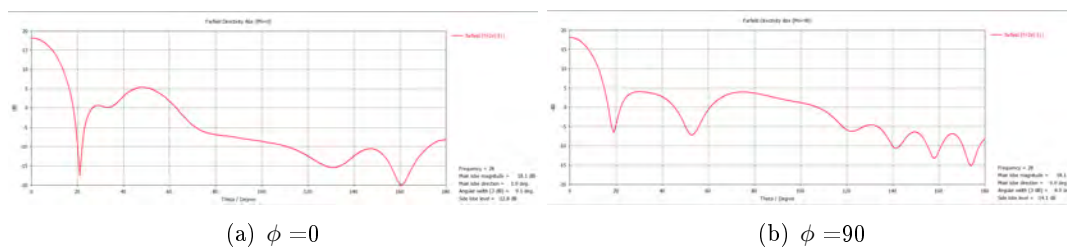


Figura 8.30: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

En este caso, el plano XZ y el plano YZ son prácticamente iguales, en ambos casos el lóbulo principal proporciona 18.1 dB, apareciendo el primer lóbulo lateral a 5 dB, por lo que entre ambos lóbulos existen 13 dB de diferencia.

- Se obtiene el siguiente diagrama en polares:



Figura 8.31: Diagrama de radiación de la antena en polares

Tanto en el caso de $\phi = 0$, como de $\phi = 90$, se puede apreciar claramente la aparición de un lóbulo principal (entre los -18° y 18°) y 2 lóbulos laterales a cada lado. Igualmente se puede apreciar que con este diseño vuelven a aparecer lóbulos opuestos, con lo que no se evita la radiación hacia atrás.

- Para finalizar el análisis de los resultados, se deben comentar las variaciones de amplitud y fase del campo en las ranuras del array de antenas.

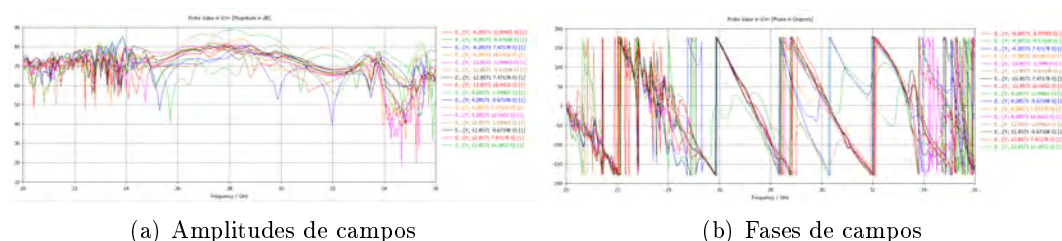


Figura 8.32: Resultados de amplitudes y fases de campo tras colocación sondas

Al igual que en los casos anteriores, sigue existiendo una variación debido a la cercanía entre las líneas, lo que provoca que existan valores de amplitud de las sondas situadas en las zonas con interferencias más lejanos a los obtenidos en otras sondas donde no existen dichas interferencias (entre 75-82 V/m a 28 GHz).

En el caso de las fases de los campos obtenidos, los resultados son bastante parecidos, donde la mayoría de las fases producidas están en un rango de 50° , entre los -80° y los -130° a los 28 GHz.

Por lo tanto, tras analizar los resultados obtenidos con la realización de estas pruebas de cambio de periodo y altura de los pines, se puede concluir, que con ambos diseños se mejoran los resultados obtenidos en lo que adaptación del puerto 1 se refiere, ya que se consigue adaptar el diseño a 28 GHz, especialmente en el caso de $pin = 2.5mm$ y $periodo = 3mm$. Además también cabe destacar que utilizando el diseño de $pin = 2.5mm$ y $periodo = 2mm$, se consigue evitar completamente la radiación hacia atrás, algo que no ocurre en ninguno de los casos en los que se utiliza un periodo entre pines de 3 mm.

8.5. Conclusiones

En este capítulo se han presentado los diferentes resultados que aporta el array de antenas de ranura 4 x 4 para diversas pruebas realizadas.

Para ello, se ha añadido al diseño un array de pines que minimice todo lo posible la radiación hacia atrás de el array, comparando los resultados obtenidos con los que se obtendrían si no se utilizarán dichos pines.

Igualmente, se han configurado el diseño del array para conseguir un array simétrico y así intentar obtener un diagrama de radiación lo más simétrico posible.

A su vez, también se ha comprobado que el campo emitido (en amplitud y fase) a través de cada ranura es distinto debido a las interferencias producidas en la línea de alimentación del diseño.

La variación de resultados producidas por estas pruebas nos pueden ayudar a entender cómo funciona nuestro diseño, ya que con simplemente variar un parámetro del mismo, como puede ser el periodo existente entre los pines del metal, se consigue el mismo diagrama de radiación obtenido anteriormente y además se consigue evitar la radiación hacia atrás.

Para concluir, se puede deducir que el diseño con $pin = 2.5mm$ y $periodo = 2mm$ es el que mejor resultados proporciona, por lo que finalmente, será este diseño el que se construirá, ya que se ha obtenido una gran directividad a la frecuencia de 28 GHz, así como una gran adaptación del puerto de entrada, y una impedancia característica de 50Ω , objetivos que se pretendían conseguir cuando se comenzó a realizar este proyecto.

Capítulo 9

Array de antenas de ranura 8 x 8

En este capítulo se va a realizar el diseño final del array de antenas de ranura 8 x 8, añadiendo los pines para evitar la radiación hacia atrás y realizando todas las variaciones en el diseño necesarias para conseguir que los resultados sean óptimos.

9.1. Array de antenas 8 x 8

En esta sección se va a diseñar el array final de antenas de ranura 8 x 8, partiendo del diseño ya realizado en la sección 6.7 del capítulo 6.

Al igual que en el capítulo anterior 8, simplemente se debe añadir al diseño existente un array de pines que eviten que nuestra antena radie hacia atrás, cambiando a su vez las condiciones de contorno actuales.

9.1.1. Diseño

Como ya se comentado anteriormente, se va a proceder a la creación de un array de pines, que eviten la radiación hacia atrás. Por ello, se procede a cambiar las condiciones de contorno o *Boundaries* a su valor inicial, para que el array de antenas radie en todas las direcciones del espacio.

En la subsección 8.1.1 del capítulo anterior ya se realizó este mismo procedimiento, cambiando simplemente Z_{min} para que utilice la opción open (add space), al igual que el resto de coordenadas.

Tras realizar este cambio de configuración, se modifica el valor de las dimensiones horizontal y vertical, donde ambos campos tendrán el valor $A_t = B_t = 76.00mm$, por lo que se puede borrar el parámetro tam_{antena} de nuestro diseño.

Posteriormente, se crean las nuevas variables que se utilizarán para crear los pines. Estas variables son las mismas a las utilizadas en la sección 8.1 del capítulo anterior 8, especificadas en la tabla 8.1.

Tras crear las variables, se debe crear el array de pines, para ello, inicialmente se debe crear el metal que une dichos pines y sobre el que estarán colocados. Este metal de pines se creará de la misma forma que la especificada en la tabla 8.2 del array final 4 x 4, donde solamente cambia el valor de las dimensiones, tal y como se han especificado anteriormente.

Una vez creado el metal de pines, se debe calcular el posible número de pines que se pueden crear, así como su posición. Como el metal tiene una longitud de 76 mm, un pin mide 1 mm y entre el inicio de los pines existe un espacio de 3 mm, si se colocará el inicio del primer pin en el borde del metal, se podrían crear 26 pines, quedando justamente el ultimo pin creado en el otro extremo del metal.

Por lo tanto, tras realizar este cálculo, se procede a crear los pines, para ello, simplemente se crea un pin al igual que en la tabla 8.3 de la subsección 8.1.1 del capítulo anterior y posteriormente se traslada para crear los siguientes.

En este caso, se utiliza un factor de traslación de 25 y vector de traslación $X = d_{pin}$, creando así los

pinos de la primera fila. Tras esto, se seleccionan todos los pines creados, para volver a trasladarlos. Seleccionando factor de traslación 25 y vector $Y = -d_{pin}$, creando de esta forma todos los pines restantes, y obteniendo los 676 pines del array de pines 26 x 26.

Una vez realizas las traslaciones, se deben unir todos los pines existentes al metal de pines creado anteriormente, obteniendo la siguiente figura:

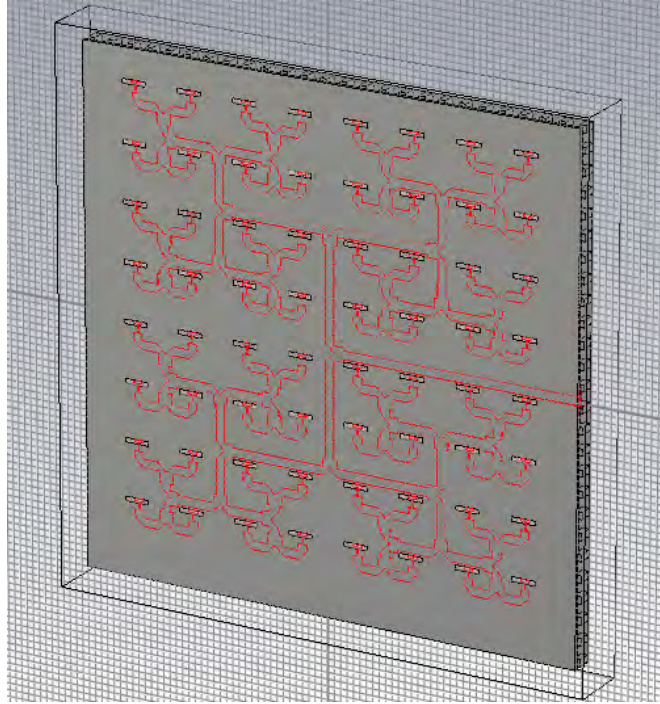


Figura 9.1: Figura array de antenas 8 x 8

Por lo tanto, ya se puede realizar la simulación de este nuevo array de antenas de ranura.

9.1.2. Resultados diseño

Tras finalizar el diseño de nuestro array 8 x 8, se realiza la simulación.

Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

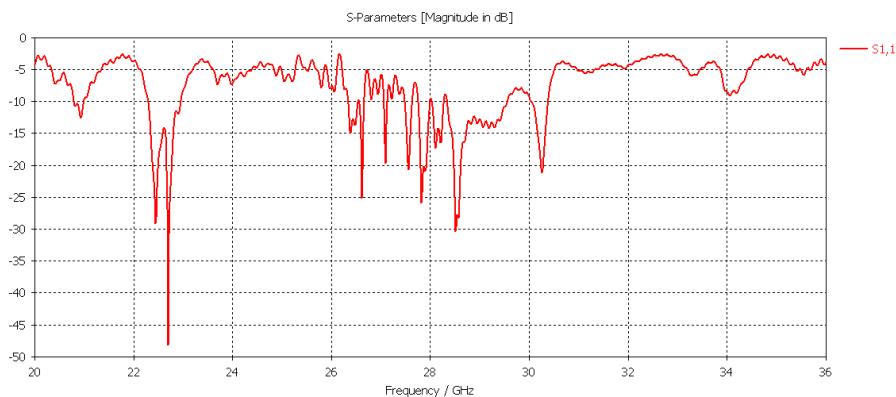


Figura 9.2: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8

Como se puede ver, se obtienen -30 dB a una frecuencia de 28.5 GHz.

Comentar que si se comparan estos resultados con los obtenidos en la sección 6.7 del capítulo 6, se puede

concluir que se obtienen mejores resultados de Γ , ya que se pasa de obtener -24 dB en el caso anterior a los actuales -30 dB.

La impedancia característica no varía, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.7\Omega$.

Igualmente se puede observar como varía el diagrama de radiación de nuestro array de antenas de ranura. Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

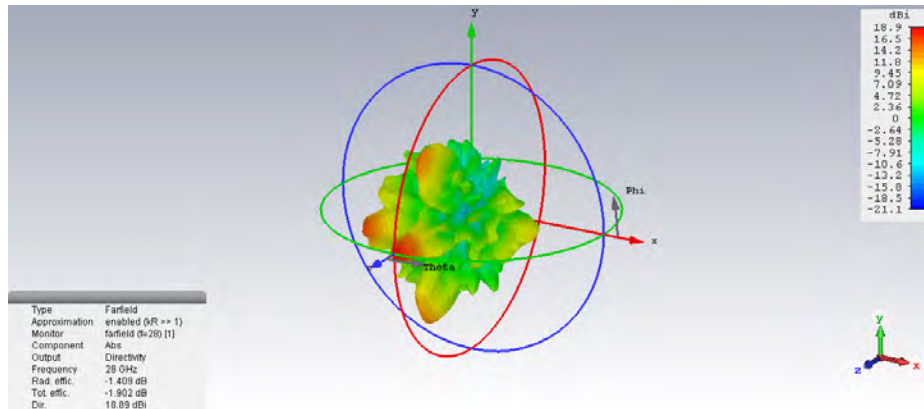


Figura 9.3: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 18.89 dB, apareciendo varios lóbulos laterales de gran tamaño.

Comentar que la directividad que proporciona el diseño debido a la introducción de los pines se ve decrementada en aproximadamente 2 dB.

Igualmente comprobamos los resultados obtenidos en 2 dimensiones:

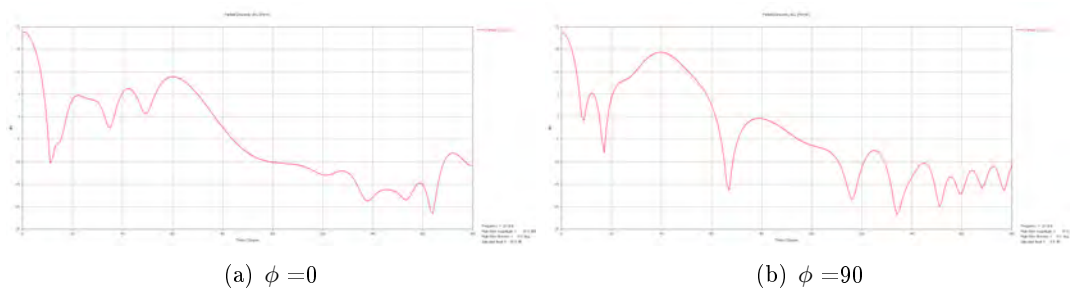


Figura 9.4: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

Como se puede observar, en el plano XZ el lóbulo principal proporciona 18.9 dB, apareciendo el primer lóbulo lateral a casi 5 dB, por lo que entre ambos lóbulos existen casi 14 dB, aunque también existe un lóbulo lateral 9 dB, que hace que entre los dos mayores lóbulos existan 10 dB. Mientras que en el plano YZ, el lóbulo principal sigue proporcionando 18.9 dB, pero al igual que en el plano anterior, existe un lóbulo lateral (no el lóbulo secundario), que proporciona casi 15 dB, por lo que existen unos 5 dB entre ambos lóbulos.

Para finalizar, se observan los resultados del diagrama de radiación en coordenadas polares:

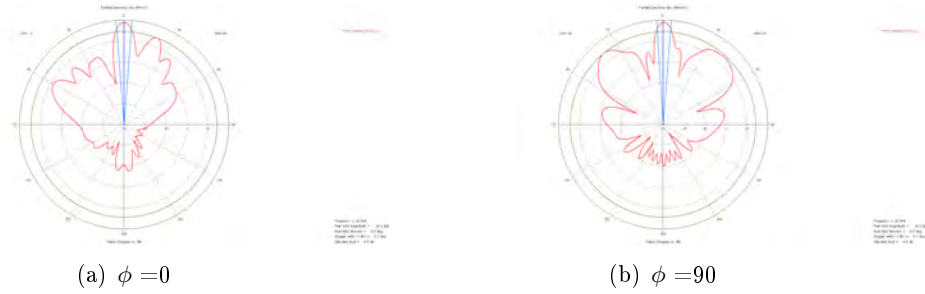


Figura 9.5: Diagrama de radiación de la antena en polares

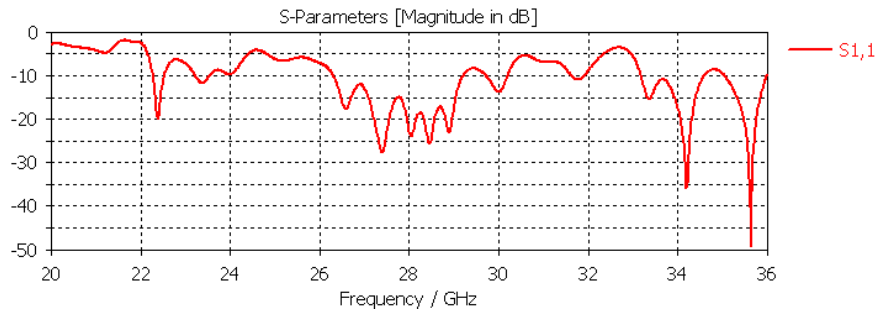
En este caso, el lóbulo principal llega hasta los 15° aproximadamente en ambos casos y el lóbulo secundario se encuentra entre los 15° y los 30° en el caso de $\phi = 0$ y entre los 15° y los 60° en el caso de $\phi = 90$. También se pueden observar en ambos casos la radiación hacia atrás producida con este diseño.

9.2. Pruebas de pines en diseño array 8 x 8

Para comprobar el buen funcionamiento de los pines creados, al igual que en el capítulo anterior, se va a realizar la simulación sin utilizarlos, pero con la misma configuración de las condiciones de contorno, es decir, con todas las *Boundaries* configuradas como open (add space). Para ello, se van a realizar dos simulaciones distintas, la primera utilizando solamente el mismo metal de los pines (pero sin los pines) y la segunda sin utilizar dicho metal de pines.

Tras realizar la primera simulación, solamente añadiendo el metal, se obtienen los siguientes resultados:

- Parámetro S_{11} :

Figura 9.6: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8 sin pines

Como se puede ver, se obtienen -27 dB a una frecuencia de 27.5 GHz. A la frecuencia de 28 GHz se obtienen aproximadamente -24 dB.

- La impedancia característica no ha cambiado con respecto al caso anterior, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.7\Omega$.
- Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

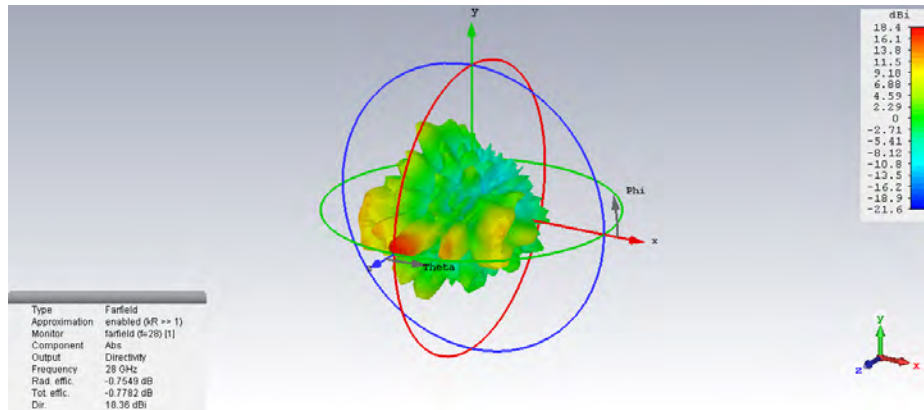


Figura 9.7: Diagrama de radiación de la antenna sin pines en 3 dimensiones

En este caso, a 28 GHz se obtienen 18.36 dB de directividad, 0.5 dB por debajo de la obtenida cuando se usan los pines.

Como se puede ver, existe radiación en la dirección opuesta, debido a que pese a la colocación del metal, no surge igual efecto sin los pines. Estos resultados se podrán apreciar mejor en la figura del diagrama de radiación en coordenadas polares.

- Diagrama de radiación en 2 dimensiones:

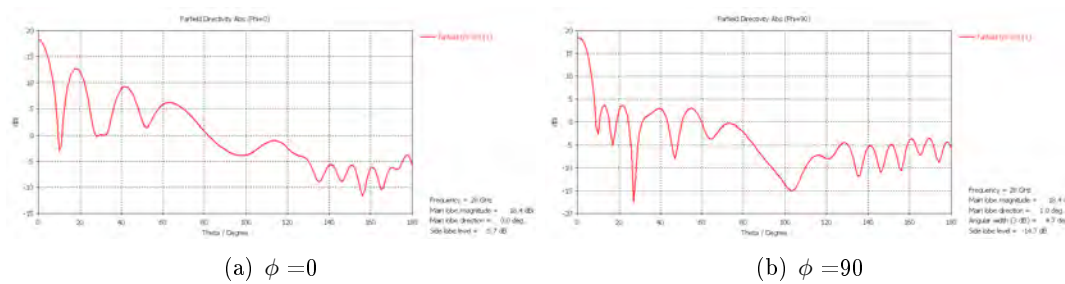


Figura 9.8: Diagrama de radiación de la antenna sin pines en cartesianas

Como se puede ver, en el plano XZ existen solamente 6 dB entre el lóbulo principal y el primer lóbulo lateral, mientras que en el plano YZ entre dichos lóbulos existen 14 dB. Igualmente se pueden observar las grandes desviaciones existentes a partir de los 90° en ambos planos. Esto destaca en contraposición con el caso anterior, en el que las desviaciones eran más leves.

- Diagrama de radiación en polares:

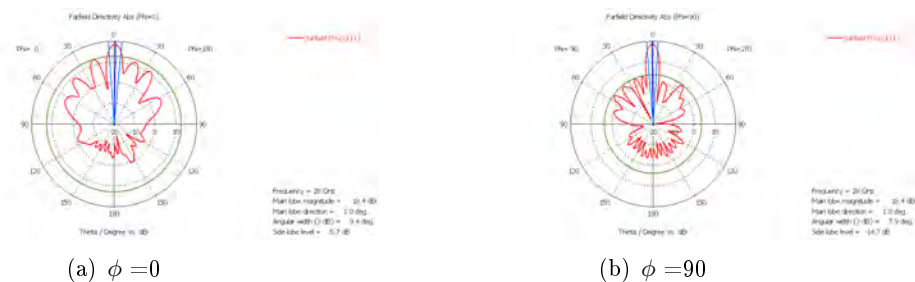


Figura 9.9: Diagrama de radiación de la antenna sin pines en polares

Se puede observar, al igual que en los planos en 2 dimensiones, que los lóbulos que radian en la dirección opuesta, en esta ocasión son mucho más grandes y con cambios más drásticos.

Por lo tanto, se puede concluir que quitando los pines no se consigue evitar la radiación hacia atrás, ya que aparecen más lóbulos en dirección opuesta y de mayor tamaño, así como una peor adaptación del puerto 1.

Al realizar la segunda simulación, sin el metal de pines, se obtienen los siguientes resultados:

- Parámetro S_{11} :

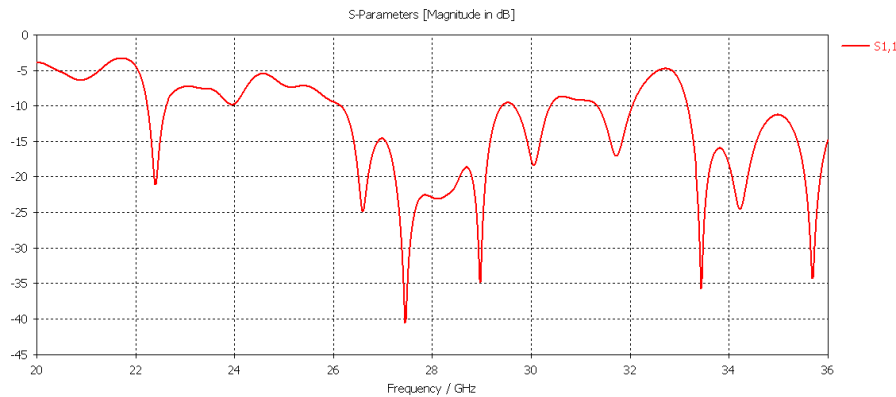


Figura 9.10: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8 sin metal de pines

Como se puede ver, se obtienen -40 dB a una frecuencia de 27.5 GHz, consiguiendo a su vez -23 dB a la frecuencia de 28 GHz.

- La impedancia característica no varía, permaneciendo en los $Z_{ref} = 49.7\Omega$.
- Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

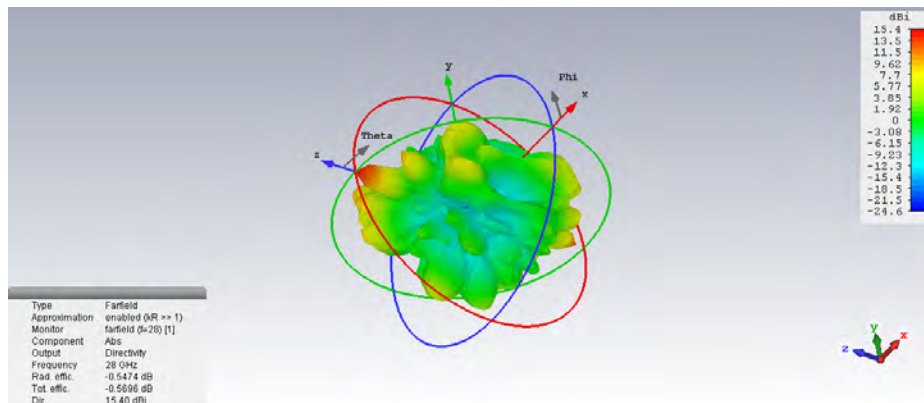


Figura 9.11: Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en 3 dimensiones

En este caso, a 28 GHz se obtienen 15.40 dB de directividad, 3.5 dB por debajo de la obtenida cuando se usan los pines y 3 dB menos con respecto al caso en el que se usa metal sin pines.

Pero al igual que en la simulación anterior, el análisis principal es de la radiación producida hacia atrás, ya que aparecen varios lóbulos en la dirección opuesta, especialmente un gran lóbulo posterior. Esto es debido a que al no colocar nada y mantener las condiciones de contorno como open (add space), la antena radia en todas direcciones.

- Diagrama de radiación en 2 dimensiones:

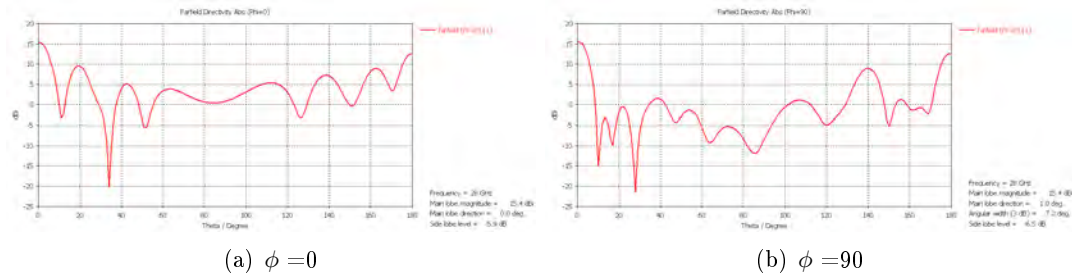


Figura 9.12: Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en cartesianas

Como se puede ver, en el plano YZ existen grandes desviaciones (de hasta 12 dB) a 180° perteneciente al lóbulo posterior.

- Diagrama de radiación en polares:

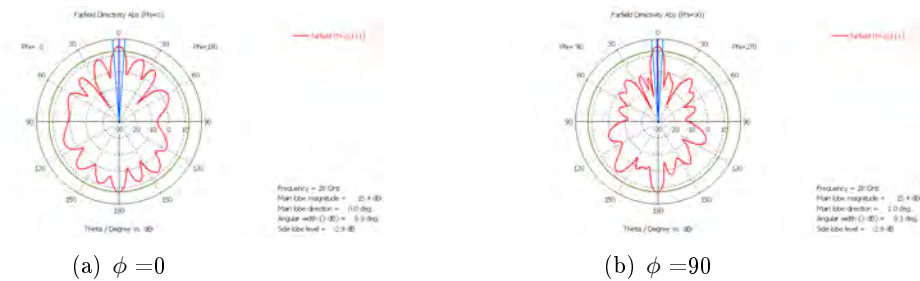


Figura 9.13: Diagrama de radiación de la antena sin metal de pines en polares con $\phi = 0$

Se puede observar, al igual que en los planos en 2 dimensiones, que los lóbulos que radian en dirección opuesta son mucho más grandes, en especial el lóbulo posterior de algo más de 12 dB.

Se puede concluir que quitando el metal de pines no solo no se consigue evitar la radiación hacia atrás, sino que aparecen muchos más lóbulos en dirección opuesta e incluso un gran lóbulo posterior.

Por lo tanto, se ha demostrado la importancia de la colocación de los pines en el diseño, para evitar en todo lo posible la radiación hacia atrás.

9.3. Array final de antenas 8 x 8

9.3.1. Diseño final array 8 x 8

Para finalizar el diseño de nuestro array, al igual que en el caso del array 4 x 4, se pretende conseguir que el diagrama de radiación sea simétrico, realizando un leve cambio en las dimensiones, para conseguir que el array de antenas sea cuadrado; partiendo siempre del diseño del array 8 x 8 del que ya disponemos. Con ese cambio se concluye el diseño de nuestro array de antenas de ranura 8 x 8, por lo que se puede realizar la simulación final.

9.3.2. Resultados diseño final array 8 x 8

Al realizar esta primera simulación, se observa que apenas varían los resultados respecto a los obtenidos en la subsección 9.1.2 de la sección 9.1 de este mismo capítulo, ya que las variaciones del diseño son

mínimas. Para ello, recordamos que con este diseño se obtiene un parámetro S_{11} de -30 dB a 28.5 GHz, una impedancia característica de 49.7Ω y una directividad de 18.9 dB a 28 GHz.

9.4. Pruebas finales array 8 x 8

Como se puede ver, los resultados no son tan buenos como se esperaban, debido a ello, se va a realizar una nueva simulación tras variar algunos componentes del diseño. Tal y como se hizo con el array 4 x 4, se varia el periodo y la altura de los pines, donde sus nuevos valores serán $pin = 2.5mm$ y $periodo = 2mm$.

Al igual que en el caso del array 4 x 4, esto provoca que haya que cambiar la configuración de los pines, ya que ahora solamente deben estar desplazados 0.31 mm hacia abajo y hacia la derecha desde el borde superior izquierdo del metal. Tras realizar este cambio, se añaden los nuevos pines que sean necesarios para completar el array, obteniendo en este caso un array de pines 35 x 35.

Finalmente, tras realizar este nuevo cambio en el diseño del array 8 x 8, se procede a realizar una nueva simulación, con la que se obtienen los siguientes resultados:

- Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

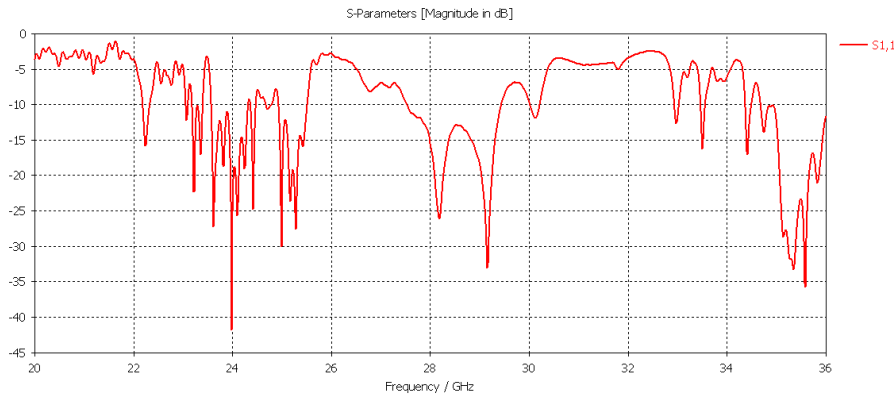


Figura 9.14: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8

Con el nuevo cambio de diseño, se obtienen -26 dB a una frecuencia de 28.1 GHz y -33 dB a 29 GHz, consiguiendo además un ancho de banda de aproximadamente 2 GHz a -10 dB.

- La impedancia característica permanece constante en los $Z_{ref} = 49.7\Omega$, tal y como se esperaba.
- Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

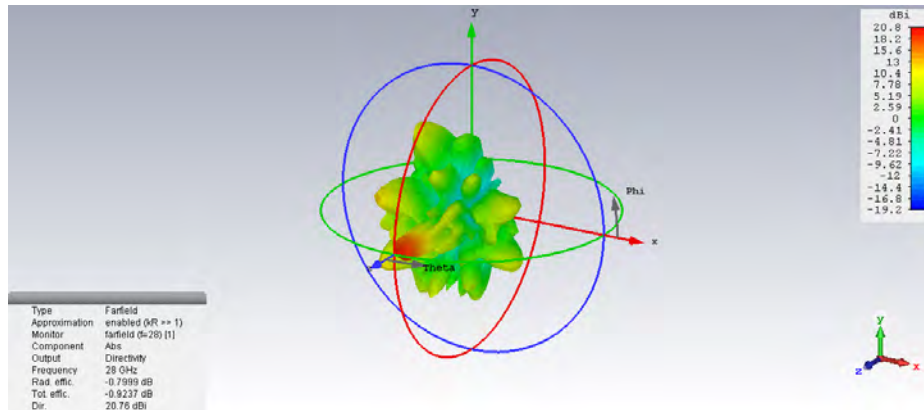


Figura 9.15: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Se observa que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 20.76 dB, casi 2 dB más a los obtenidos en la subsección 9.1.2 antes de eliminar el metal sobrante del diseño. Por lo tanto, el nuevo diseño mejora la prestaciones de directividad de nuestra antena.

- Se obtiene el siguiente diagrama en 2 dimensiones:

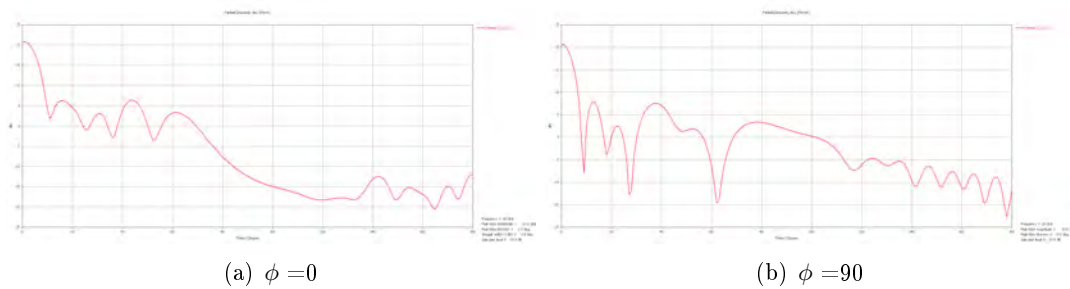


Figura 9.16: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

En este caso, el plano XZ y el plano YZ son prácticamente iguales, en ambos casos el lóbulo principal proporciona 20.8 dB, apareciendo el primer lóbulo lateral a 7 dB, por lo que entre ambos lóbulos existen 13 dB, por lo tanto, se consigue el valor esperado entre los lóbulos principal y secundario.

- Se obtiene el siguiente diagrama en polares:

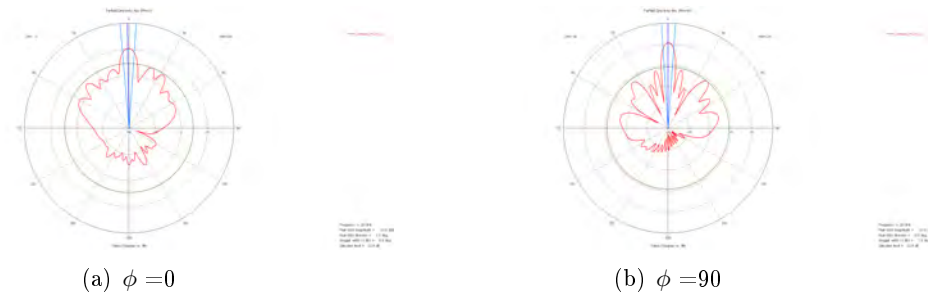
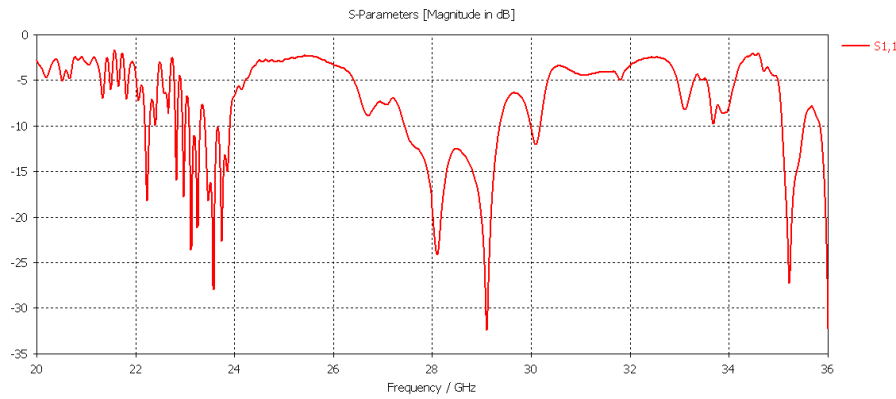


Figura 9.17: Diagrama de radiación de la antena en polares

Se puede apreciar claramente la aparición de un lóbulo principal (entre los -15° y 15°) y 4 lóbulos laterales a cada lado en ambos casos. Igualmente se puede apreciar los lóbulos opuestos que aparecen con este diseño, aunque en este caso, la radiación hacia atrás es mínima.

Con esta configuración los resultados han mejorado, por lo que se va a realizar una última simulación manteniendo los pines de $pin = 2.5mm$, pero volviendo a utilizar un periodo entre pines de $periodo = 3mm$, con la que se obtienen los siguientes resultados:

- Se puede observar como varía el parámetro S_{11} :

Figura 9.18: Parámetros S (S_{11}) array de antenas de ranura 8 x 8

Ahora se obtienen -32 dB a una frecuencia de 29 GHz, consiguiendo además un ancho de banda de 2 GHz a -10 dB.

- La impedancia característica sigue siendo $Z_{ref} = 49.7\Omega$, tal y como se esperaba.
- Se obtiene el siguiente diagrama de radiación en 3 dimensiones:

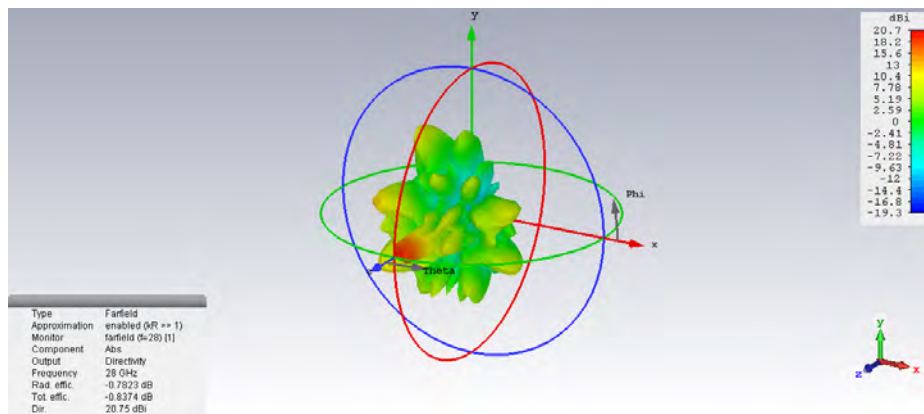


Figura 9.19: Diagrama de radiación de la antena en 3 dimensiones

Donde se puede observar que a la frecuencia de 28 GHz se obtiene una directividad de 20.75, casi 2 dB más a los obtenidos en la subsección 9.1.2. El nuevo diseño, al igual que en la prueba anterior realizada, mejora la prestaciones de directividad de nuestra antena.

- Se obtiene el siguiente diagrama en cartesianas:

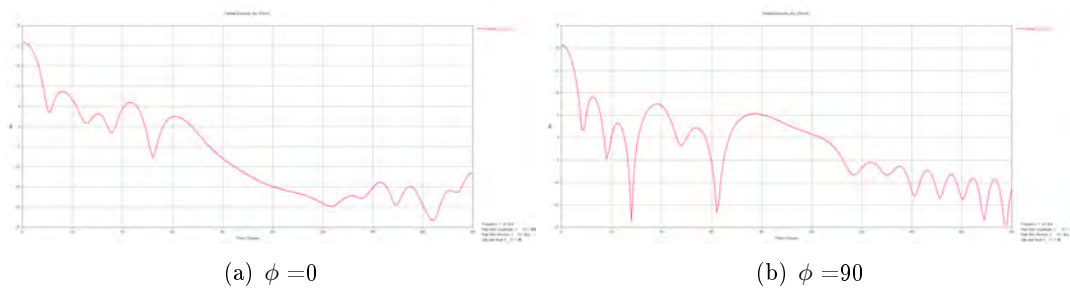


Figura 9.20: Diagrama de radiación de la antena en cartesianas

En este caso, el plano XZ y el plano YZ son prácticamente iguales, en ambos casos el lóbulo principal proporciona 20.7 dB, apareciendo el primer lóbulo lateral a 9 dB, por lo que entre ambos lóbulos existen unos 12 dB, un valor bastante cercano a los 13 dB que deberían existir.

- Se obtiene el siguiente diagrama en polares:



Figura 9.21: Diagrama de radiación de la antena en polares

En el caso de $\phi = 0$ se puede apreciar claramente la aparición de un lóbulo principal (entre los -13° y 13°) y 4 lóbulos laterales a cada lado, donde dichos lóbulos son casi simétricos, tal y como se deseaba. Igualmente se puede apreciar los lóbulos opuestos que aparecen con este diseño, de mayor tamaño a los que aparecían en el diseño anterior de *periodo* = 2mm entre pines. Mientras que en el caso de $\phi = 90$, los lóbulos siguen una distribución incluso más simétrica que en el caso anterior.

Por lo tanto, tras analizar los resultados obtenidos con la realización de estas pruebas de cambio de periodo y altura de los pines, se concluye que en el diseño de *periodo* = 2mm se evita en mayor medida la radiación hacia atrás que en el caso de *periodo* = 3mm, consiguiendo además en ambos casos el mismo nivel de directividad.

9.5. Conclusiones

En este capítulo se han presentado los distintos resultados finales que aporta el array de antenas de ranura 8 x 8.

Para ello, al igual que en el caso del array 4 x 4, se ha añadido al diseño una estructura periódica de pines que minimice todo lo posible la radiación hacia atrás del array y los acoplos entre las líneas de alimentación de las ranuras, comparando los resultados obtenidos con los que se obtendrían si no se utilizarán dicha estructura de pines.

De igual manera, se han realizado varias pruebas cambiando el diseño de los pines (altura y periodo) para comparar las diferencias existentes entre ambos diseños,

Para concluir, se puede deducir que el diseño con *pin* = 2.5mm y *periodo* = 2mm es el que mejor resultados proporciona, por lo que finalmente, será este diseño el que se construirá, ya que se ha obtenido una gran directividad a la frecuencia de 28 GHz (20.75 dB), así como una gran adaptación del puerto de entrada, una impedancia característica de 50 Ω , y es el diseño que menor radiación hacia atrás produce, objetivos que se pretendían conseguir cuando se comenzó a realizar este proyecto.

Capítulo 10

Fabricación y validación experimental

Tras realizar todas las pruebas necesarias en los diseños de los arrays 4 x 4 y 8 x 8 en los capítulos anteriores 8 y 9, se ha conseguido obtener los diseños óptimos de dichos arrays que proporcionan los resultados esperados, por lo tanto, se procede a realizar la fabricación de dichos diseños.

En los experimentos llevados a cabo, el metal de los pines no tenía ningún grosor, pero para su construcción se ha variado su espesor y se ha utilizado un metal de 2 mm de grosor, ya que es necesaria una superficie lo suficientemente grande y robusta para evitar que nuestros diseños se doblen.

Igualmente, se ha ampliado minimamente el tamaño de los diseños, para posteriormente eliminar un pin para realizar un agujero en su lugar y así poder unir la estructura de pines con el circuito de array de antenas de ranura mediante un "tornillo".

Para la fabricación de la estructura de pines de dichos diseños se han llevado a cabo diferentes métodos de construcción:

- En el caso del array 4 x 4, la estructura de pines se ha fabricado con una impresora 3D metálica, es decir, una impresora 3D que imprime directamente con material metálico.



Figura 10.1: Estructura de pines de array 4 x 4

- Mientras que la estructura de pines del array 8 x 8 se ha fabricado mediante fresado.

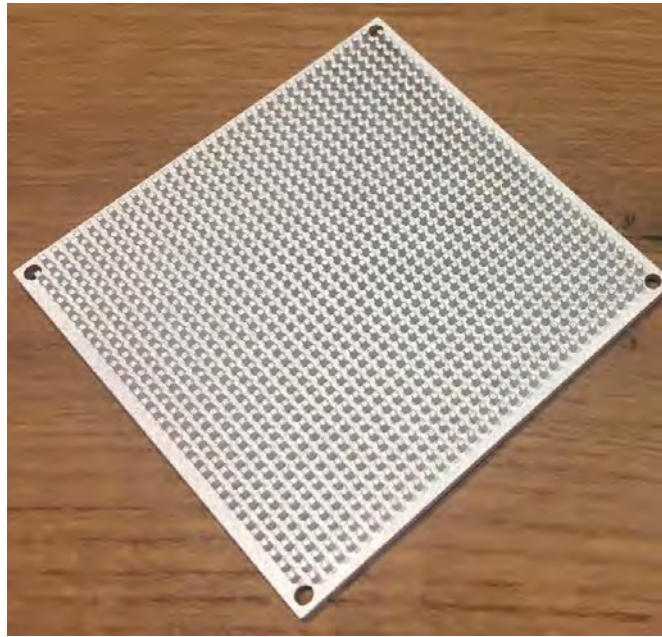


Figura 10.2: Estructura de pines de array 8 x 8

En la siguiente figura, se puede ver la comparación de tamaño entre ambas estructuras:

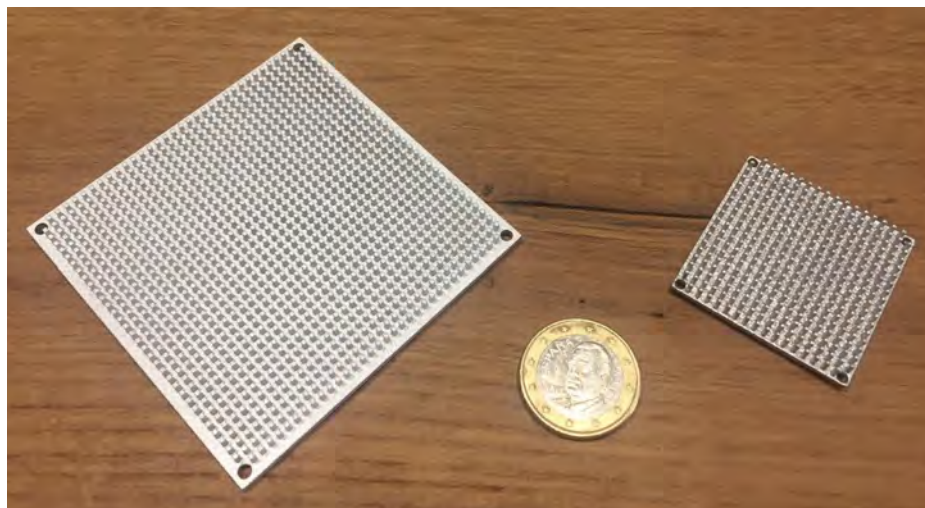


Figura 10.3: Comparación estructuras de pines de ambos arrays

Comentar que la terminación de la estructura de pines del array 8 x 8 realizada mediante fresado es mejor que la estructura de pines del 4 x 4 realizada con la impresora 3D.

Igualmente, se han mandado fabricar los circuitos de ambos arrays de antenas de ranura, que no han podido fabricarse en las instalaciones de la universidad porque algunas líneas eran demasiado estrechas (0.1 mm) y que lamentablemente a la hora de entregar esta memoria dichos prototipos no están a nuestra disposición.

Capítulo 11

Planificación, presupuesto y análisis del impacto socio-económico

11.1. Presupuesto

El presupuesto que se va a plantear está basado en 3 aspectos diferentes:

1. Tendremos en cuenta todas las horas que hemos necesitado para realizar cada una de las fases de desarrollo del proyecto. En todas las fases de desarrollo descritas a continuación participan tanto el alumno como el tutor del TFG, estableciendo un seguimiento a través de reuniones presenciales y métodos electrónicos a lo largo de todo el proyecto.

Concepto	Horas
Planificación inicial del proyecto	10
Búsqueda de información y documentación previa	20
Aprendizaje de la herramienta CST Microwave Studio	20
Diseño y simulaciones de antena de ranura	40
Diseño y simulaciones de antena de ranura de banda ancha	50
Diseño de red de alimentación	110
Diseño y simulaciones de estructura de pines	30
Diseño y simulaciones de array en las dos versiones	190
Redacción de la memoria	180
Total	650

Tabla 11.1: Tabla resumen horas realizadas por cada tarea

2. También debemos tener en cuenta el valor de los materiales utilizados para la fabricación de ambos arrays de antenas de ranura:

Concepto	Precio(€)
Prototipo circuito array 4 x 4	102.11
Prototipo estructura de pines array 4 x 4	199
Prototipo circuito array 8 x 8	104.20
Prototipo estructura de pines array 8 x 8	500
Total	905.31

Tabla 11.2: Tabla precio de medios materiales

3. Finalmente, se debe tener en cuenta el precio por hora que se asignará a los participantes en la realización del proyecto:

La tutora del TFG cobrará un precio de 25 €/hora.

El autor, cobrará como becario un precio de 5 €/hora, al no poseer aún el título de ingeniero.

Personal	Horas empleadas	€/hora	Precio(€)
Tutora	80	25	2000
Autor	650	5	3250
Total	-	-	5250

Tabla 11.3: Tabla precio medios personales

Por lo tanto, teniendo en cuenta todos los costes el presupuesto final queda de la siguiente forma:

Concepto	Precio(€)
Precio medios personales	5250
Precio medios materiales	905.31
Coste total del TFG	6155.31

Tabla 11.4: Tabla precio de materiales

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de 6155.31 EUROS.

11.2. Impacto socio-económico

El crecimiento casi exponencial del uso de este tipo de antenas, y de otras antenas en general a supuesto un significativo aumento de la contaminación electromagnética y de la percepción social del riesgo asociado a estos elementos.

Esto supuso el establecimiento de normativas más preventivas y niveles de exposición al público más restrictivos, para hacer compatible el desarrollo de estos elementos y la salud pública.

La fabricación de este tipo de antenas no tiene un coste demasiado elevado y como se ha podido comprobar son bastante eficientes y aportan directividades elevadas.

Capítulo 12

Conclusiones y líneas futuras

El objetivo de este proyecto era la creación de un array de antenas de ranura 8 x 8, aunque también se ha realizado un array de antenas de ranura 4 x 4.

Para ello, se han llevado a cabo todos los pasos y optimizaciones necesarias para realizar ambos arrays de antenas de ranura 4 x 4 y 8 x 8.

Inicialmente, se ha diseñado una antena de ranura de banda ancha, configurando los diferentes parámetros o componentes usados para conseguir que radie a 28 GHz, con el mayor ancho de banda posible y siendo alimentada por una línea de 50Ω .

Para concluir, mediante el uso de varias de estas antenas de banda ancha y el diseño de una red de alimentación, se ha realizado el diseño de ambos arrays de antenas de ranura con el fin de conseguir que proporcionen la mayor directividad posible a la frecuencia de trabajo de 28 GHz, minimizando la radiación hacia atrás, y con la obtención de las menores pérdidas de reflexión posibles en el puerto de entrada de la red de alimentación.

La optimización lograda en los dos diseños realizados ha sido aceptable, ya que se buscaba para el parámetro S_{11} unos niveles por debajo de -10 dB, valor que en determinados rangos de frecuencia se ha superado, especialmente en el rango de frecuencia en el que trabaja nuestro array de antenas. De este modo, se han conseguido unos niveles de directividad muy buenos, ya que en el diseño de menor tamaño se han conseguido 18 dB y en el diseño de mayor tamaño 20 dB.

La realización de este proyecto abre una gran variedad de líneas futuras. Viendo los resultados obtenidos en el diseño de mayor tamaño, se podría estudiar la creación de un array de antenas de ranura mayor, es decir, de dimensiones 16 x 16. De la misma forma, otra línea futura de trabajo sería la creación final de un array de antenas de ranura 2 x 2 si las dimensiones a las que se quiere integrar el diseño fueran limitadas.

Finalmente, otra línea futura de trabajo sería hacer este mismo estudio para diferentes tipos de materiales, para observar y comparar en cuáles de ellos se obtienen mejores resultados.

Bibliografia

- [1] Ieee standard for definitions of terms for antennas. *IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993)*, pages 1–50, March 2014.
- [2] Á.C. Aznar, J.R. Robert, J.M.R. Casals, L.J. Roca, S.B. Boris, and M.F. Bataller. *Antenas*. e-politecnos. Universitat Politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, 2004.
- [3] C.A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 2015.
- [4] Yong-Woong Jang. Wide-band t-shaped microstrip-fed twin-slot array antenna. *ETRI Journal (Revision February 16, 2001)*, 23(1):33–38, March 2001.
- [5] C.J. Ong. *An Analysis of Microstrip-fed Slot Antenna Arrays*. National University of Singapore, 1998.
- [6] D.M. Pozar, D.H. Schaubert, IEEE Antennas, and Propagation Society. *Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*. Electrical engineering, antennas and propagation. Wiley, 1995.
- [7] A. U. Zaman and P. S. Kildal. Wide-band slot antenna arrays with single-layer corporate-feed network in ridge gap waveguide technology. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(6):2992–3001, June 2014.